

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа энергетики

Отделение/НОЦ Отделение электроэнергетики и электротехники

Направление подготовки 13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника

Профиль Оптимизация развивающихся систем электроснабжения

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Автономная СЭС с распределенной фотоэлектрической генерацией

УДК 621.311.243.082.52

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Е	Муравьев Дмитрий Игоревич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Лукутин Борис Владимирович	д.т.н., профессор		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Фигурко Аркадий Альбертович	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Амелькович Юлия Александровна	к.т.н., доцент		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель профиля ООП	Обухов Сергей Геннадьевич	д.т.н., доцент		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Применять углубленные естественнонаучные, математические, социально – экономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.
P2	Формулировать задачи в области электроэнергетики и электротехники, анализировать и решать их с помощью всех требуемых и доступных ресурсов в условиях неопределенности.
P3	Выполнять инженерные проекты с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического и электротехнического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.
P4	Проводить инновационные инженерные исследования в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.
P5	Применять современные методы и инструменты практической инженерной деятельности при решении задач в области электроэнергетики и электротехники.
P6	Способность осуществлять технико-экономическое обоснование проектов.
<i>Универсальные компетенции</i>	
P7	Совершенствовать и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, добиваться нравственного и физического совершенствования своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.
P8	Свободно пользоваться русским и иностранным языками как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности.
P9	Способность действовать в нестандартных ситуациях, нести ответственность за принятые решения.

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа энергетики

Отделение/НОЦ Отделение электроэнергетики и электротехники

Направление подготовки 13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника

Профиль Оптимизация развивающихся систем электроснабжения

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель отделения ООП

(Подпись) (Дата) Обухов С.Г.
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ6Е	Муравьеву Дмитрию Игоревичу

Тема работы:

Автономная система электроснабжения с распределенной фотоэлектрической генерацией	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	19.02.2018 г. № 1130/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	22.05.2018
------------------------------------------	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Автономная система электроснабжения радиального типа напряжением 0,4 кВ в поселке Токма Иркутской области; 2. Месторасположение рассматриваемого поселка, суточные графики электропотребления и инсоляции.
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	1. Обзор отечественной и зарубежной литературы; 2. Анализ характеристик автономных систем электроснабжения; 3. Моделирование автономной системы электроснабжения в среде MatLab; 4. Проведение опытов; 5. Финансовый менеджмент и социальная ответственность; 6. Заключение.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	1. Суточные графики энергетического баланса для сезонов года; 2. Электрические схемы.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Фигурко А.А
Социальная ответственность	Амелькович Ю.А.
Раздел, выполненный на иностранном языке	Матухин Д.Л.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Введение, Инфляция, эскалация и деэскалация, Результаты экономической модели и анализ чувствительности, Заключение	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
------------------------------------------------------------------------------------------	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Лукутин Борис Владимирович	д.т.н., профессор		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM6E	Муравьев Дмитрий Игоревич		

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа энергетики

Отделение Электроэнергетика и электротехника

Направление подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Уровень образования магистратура

Период выполнения весенний семестр 2017/2018 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	22.05.2018
------------------------------------------	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (%)
28.09.2017	Обзор литературы по возобновляемым источникам энергии	8
14.10.2017	Гибридные системы электроснабжения	12
02.11.2017	Моделирование автономной системы электроснабжения радиального типа 0,4 кВ с распределенной фотоэлектрической генерацией в среде MatLab	25
11.12.2017	Построение графиков нагрузки и инсоляции в средах, MS Excel, Mathcad, HOMER Energy	25
27.01.2018	Расчет величин нагрузок потребителей в среде MS Excel	10
07.02.2018	Анализ результатов моделирования исследуемых вопросов	10
19.02.2018	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
13.04.2018	Социальная ответственность	10
21.05.2018	Завершение магистерской диссертации	100

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Лукутин Борис Владимирович	д.т.н., профессор		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель отделения	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ООП	Обухов Сергей Геннадьевич	д.т.н., доцент		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 149 с., 55 рис., 15 табл., 100 источников, 3 прил.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, фотоэлектрическая генерация, распределенная энергетика, автономные системы электроснабжения.

Объектом исследования является автономная система электроснабжения радиального типа напряжением 0,4 кВ с дизельной электрической станцией с. Токма в Иркутской области.

Цель работы: создание математической модели автономной системы электроснабжения с распределенной фотоэлектрической генерацией, где учитывается необходимость большого количества расчетов, связанных с суточными изменениями инсоляции и электропотребления. Основная фокусировка сил направлена на поддержание стабильной величины напряжения, снижение потерь в линиях электропередачи в зависимости от соотношения мощностей дизельной и фотоэлектрической станций, определение точек присоединения фотоэлектростанции к автономной электрической сети.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: в результате исследований сформирована математическая модель-проект, которая может быть использована для определенной автономной системы электроснабжения с гибридной интеграцией возобновляемого источника энергии.

Степень внедрения и область применения: разработанная модель-проект, может быть использована для дальнейших научно-исследовательских задач и анализа автономных систем с децентрализованным электроснабжением.

Экономическая эффективность/значимость работы: реализация предложенных мероприятий позволит снизить электропотребления от основного источника (дизельной станции), экономить топливный ресурс, снизить потери электрической энергии в линиях электропередачи.

СОДЕРЖАНИЕ

РЕФЕРАТ.....	6
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	9
ВВЕДЕНИЕ	11
1 ХАРАКТЕРИСТИКА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ.....	14
1.1 Общие сведения.....	14
1.2 Обзор литературы	15
1.3 Тенденции развития распределенной фотоэлектрической генерации за рубежом	18
1.3.1 Соединенные Штаты Америки	18
1.3.2 Германия	21
3.1.2 Чешская Республика	24
3.1.2 Китайская Народная Республика.....	28
1.4 Распределенная генерация в России	33
2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ MATLAB	45
2.1 Блок дизельной электростанции.....	45
2.2 Блок солнечной электростанции.....	48
2.3 Блок солнечной радиации и температуры окружающей среды	53
2.4 Блок потребителей и линий электропередачи.....	59
3 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ.....	64
3.1 Вопросы повышения качества электрической энергии.....	64
3.1.2 Блок-схема АСЭС с распределенной системой ФЭС	64
3.1.2 Регулировка солнечной электростанции.....	66
3.1.3 Инвертор	69
3.1.4 Аккумуляторные батареи	75
3.1.5 Дизельная электрическая станция	78
3.2 Результаты технико-экономического анализа	80
4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	84
4.1 Снижение расхода топлива от дизельной электростанции.....	84
4.2 Капитальные инвестиции	85
4.3 Амортизационные отчисления	87
4.4 Переменные, эксплуатационные и постоянные издержки	87
4.5 Инфляция, эскалация и деэскалация	88
4.6 Модель ценообразования капитальных активов	93
4.7 Результаты экономической модели и анализ чувствительности	94
5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	103

5.1	Производственная безопасность	103
5.1.1.	Вредные проявления факторов производственной среды.....	103
5.1.2.	Опасные проявления факторов производственной среды.....	109
5.2	Экологическая безопасность.....	111
5.2.1.	Анализ выявления объекта исследования на окружающую среду.....	111
5.2.2.	Обоснование мероприятий по защите окружающей среды	112
5.3	Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	114
5.3.1.	Анализ вероятных чрезвычайных ситуаций.....	114
5.3.2.	Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС	115
5.4	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		118
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....		122
Приложение А		134
Приложение Б		146
Приложение В		149

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

AGM (Absorbent Glass Mat) - Абсорбированный Электролит

АСЭС – Автономные Системы Электроснабжения

АЭС – Атомная Электрическая Станция

ДЭС – Дизельные Электрические Станции

ВИЭ – Возобновляемые Источники Энергии

ВНД (Internal Rate of Return) – Внутренняя Норма Доходности

ВЭС – Ветряные Электрические Станции

ГЭС – Гидроэлектростанции

КИТ – Коэффициент Использования Топлива

КПД – Коэффициент Полезного Действия

МОЕХ (Moscow Exchange) – Московская Биржа

ПК – Персональный Компьютер

РГ – Распределенная Генерация

CAPM (Capital Asset Pricing Model) – Модель Ценообразования Капитальных Активов

CF (Cash Flow) – Денежный Поток

СМИ – Средства Массовой Информации

СМП – Северный Морской Путь

СЭС – Солнечная Электрическая Станция

ТММ (Maximum Power Point Tracking) – Точка Слежения за Максимальной Мощностью

ТЭК – Топливо-энергетический Комплекс

ТЭЦ – Теплоэлектроцентраль

ФАПЧ (Phase Lock Loop) - Фазовая Автоподстройка Частоты

ФЭП – Фотоэлектрические Преобразователь

ФЭС – Фотоэлектрические Станции

ЧПС (Net Present Value) – Чистая Приведенная Стоимость

ЧС – Чрезвычайные Ситуации

ЭДС – Электродвижущая Сила

ВВЕДЕНИЕ

Децентрализованное энергоснабжение является одним из важнейших вопросов современной энергетики. Цена на электроэнергию для потребителей в регионах с децентрализованным энергоснабжением намного превышает цену для тех, кто подключен к сети (примерно от 15 до 150 рублей в отличие от 0,97 до 8,2 рубля за 1 кВт·ч соответственно) [7]. Причинами высоких цен на электроэнергию в регионах с децентрализованным энергоснабжением являются высокие транспортные расходы, плохое обслуживание генерирующего оборудования и переменная нагрузка, что приводит к неэффективным условиям работы.

Программа «Энергетическая стратегия России на период до 2035 года» определяет следующие две основные стратегические цели использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [8]:

1. Включить новые генерирующие мощности, которые работают на основе ВИЭ, при условии, что они являются экономически эффективными.
2. Развитие отечественной научно-технической базы, передовых технологий в области использования ВИЭ, увеличения производства основного генерирующего и вспомогательного оборудования для ВИЭ в России.

Возобновляемая энергия может внести существенный вклад в решение проблемы энергоснабжения в децентрализованных регионах России, на долю которых приходится до 70% территории страны, где проживает около 14% населения. Наиболее перспективным вариантом создания автономных энергетических систем для таких децентрализованных районов является интеграция ветровых и фотоэлектрических станций в систему дизельного электроснабжения. Снижение стоимости фотоэлектрических панелей в сочетании с простотой их установки и эксплуатации увеличивает популярность фото-дизельной автономной энергии в России [1].

Солнечные распределенные генераторы являются наиболее перспективными технологиями использования возобновляемых источников энергии в сетях с низким напряжением. Распределенные генераторы установлены для удовлетворения местных потребностей в нагрузке в качестве дополнительного источника с постоянным процентом мощности от основной, к примеру, дизельной электрической станции.

Интеграция солнечной электростанции (СЭС) в автономные системы электроснабжения (АСЭС) с дизельной электростанцией (ДЭС) требует решения многих проблем, в частности:

1. Переменная нагрузка в отдаленных населенных пунктах электрификации и энергии солнечной радиации в течение дня.
2. Соотношение мощностей дизельной и фотоэлектрической частей станции в зависимости от конфигурации АСЭС.
3. Качество и стоимость потерь электроэнергии в АСЭС с распределенной фотоэлектрической генерацией.
4. Оптимальная конфигурация в зависимости от структуры одного или нескольких блоков с учетом нагрузки потребителя.
5. Технические и экономические характеристики АСЭС, где основной интерес сосредоточен на экономии дизельного топлива в ДЭС.

На первом этапе данный интеграционный проект может быть представлен математическим моделированием и последующим технико-экономическим анализом, поскольку эти модели являются гибкими, и они могут подключать дополнительные и независимые источники электроэнергии. В данной работе мы анализируем автономную систему электропитания радиального типа с напряжением 0,4 кВ в с. Токма в Иркутской области. Таким образом, мотивация исследования заключается в построении математической модели гибридной системы электроснабжения с распределенной фотоэлектрической генерацией. Модель должна быть способна сделать необходимые расчеты суточного изменения потребления электроэнергии и изменения инсоляции. Результаты

расчетов позволят определить оптимальную конфигурацию соединения возобновляемого энергоресурса и сети электропередачи. Важными индикаторами также являются качественные и стоимостные потери электроэнергии в АСЭС.

Потери мощности в проводе представляют собой произведение квадрата тока (I) и сопротивления (R) провода, описываемого формулой:

$$P_w = I^2 \cdot R. \quad (1)$$

Это означает, что при передаче фиксированной мощности на данный провод, если ток уменьшается вдвое (т. е. напряжение удваивается), потери мощности будут в четыре раза меньше [9]. Поэтому более высокое напряжение связано с меньшими потерями передачи. Математическая модель, рассмотренная в данной работе, позволяет увеличить уровень напряжения, добавив, например, систему СЭС.

Новшество проделанной работы заключается в содержании системы энергоснабжения, в алгоритме ее работы и в экономической оценке с учетом анализа чувствительности проекта. Исследование основано на данных села Токма, расположенного в Сибири, который имеет децентрализованный доступ к энергоснабжению.

Все исследования в диссертации проводятся путем анализа технических и экономических показателей энергосистем, статистических методов обработки информации и теории математического моделирования. Математическое моделирование проводится в MatLab, Homer Energy и MS Excel.

1 ХАРАКТЕРИСТИКА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

В этой главе будет представлено общее описание значения распределенной генерации (РГ), обзор литературы, связанной с полем РГ. Данная глава раскроет международный опыт в использовании РГ на примерах Германии, США, Китая и Чехии, кроме того, будет описано состояние РГ в России.

1.1 Общие сведения

Распределенная генерация – область электроэнергетики, которая производит электрическую энергию в конкретной точке или вблизи точки ее использования. Распределенная солнечная энергия может быть расположена на крышах домов или на земле и обычно связана с локальной распределительной сетью. Нынешние тенденции развития распределенной фотоэлектрической системы показывают, что государства, административные и муниципальные управления активно экспериментируют с политикой, направленной на поощрение распределенной солнечной системы, чтобы компенсировать пиковый спрос на электроэнергию и стабилизировать местную сеть по уровню напряжения. Данная работа приводит широкий обзор развития распределенной солнечной энергетики не только в России, но и в других государствах.

В 2013 году глобальный объем производства распределенных энергоресурсов составил 113,53 млрд. долл. США. Ожидается, что растущая обеспокоенность в отношении расходов, связанных с установкой линий электропередач для производства электроэнергии крупными электростанциями, увеличит рост промышленности распределенной энергетики [21].

РГ обладает способностью генерировать электричество из разных источников от обычных до нетрадиционных источников энергии. В результате они стали экологически чистой альтернативой для производства электроэнергии,

и эта тенденция, вероятно, будет продолжаться в течение следующих нескольких лет.



Рисунок 1 – Структурная схема распределенной фотоэлектрической генерации [11]

Активная экономическая поддержка, оказываемая ведущими странами в области РГ, будет стимулировать рост производства электроэнергии за счет альтернативных источников, таких как солнечная энергия, ветроэнергетика и геотермальная энергия. Однако, высокая стоимость установок РГ станет критическим фактором, отрицательно сказывающимся на росте.

1.2 Обзор литературы

За последнее десятилетие, идея интеграции распределенных фотоэлектрических генераторов в существующую АСЭС перешла в новую стадию широко применяемых, перспективы развития которой не останавливаются. Распределенные фотоэлектрические генераторы могут обеспечить множество преимуществ, включая снижение затрат на разделение энергетической системы, гибкую работу и повышенную надежность. Местная генерация может уменьшить потери энергии и отложить инвестиции в

локальную инфраструктуру, где развитию подвергнутся линии передачи и распределения электрической энергии.

Однако, помимо многих преимуществ распределенных генераторов, внедрение этих систем может быть довольно сложным в существующих энергетических магистральных сетях напряжением 0,4 кВ. Основными проблемами, связанными с распределенными ресурсами, являются проблемы регулирования напряжения, фликеры напряжения, неравномерность суточного графика потребления нагрузок потребителей, возрастающая стоимость интеграции данных установок и т.д. [1].

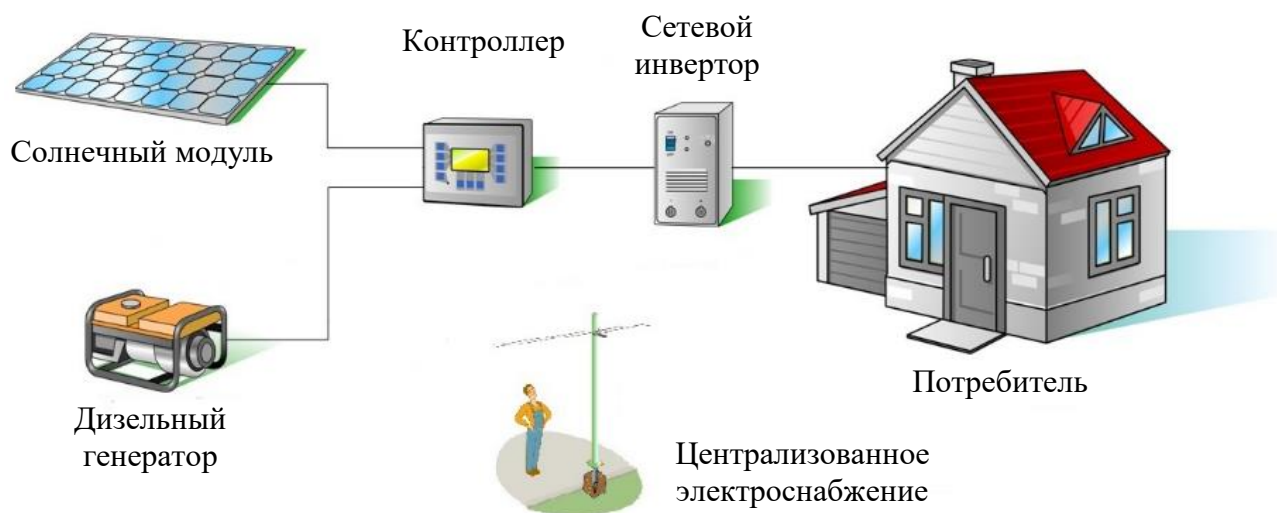


Рисунок 2 – Мнемосхема гибридной системы электроснабжения [78]

Известно, что электрическая сеть структурирована с односторонним потоком мощности: генерация, передача и распределение. Однако, с внедрением распределенных генераторов это одностороннее правило потока мощности будет уже недействительным. В отличие от традиционной генерации, распределенный генератор позволяет производить электроэнергию локально – в основном, очень близко к выделенным нагрузкам, либо иным точкам присоединения к сети. Тем не менее, поток активной мощности от распределительных ресурсов невелик.

В соответствии со стандартами европейских стран института инженеров электротехники и электроники IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 1547 [13] распределенные генераторы не вносят изменения в

регулирование напряжения или частоты. Более того, они должны работать при фиксированном коэффициенте мощности или диапазоне между 0,95 ведущим источником электрической энергии и вспомогательным. Вклад в активную мощность, в основном, является единственным условием распределенных генераторных установок. Многие работы качественно отразили преимущества данных требований к распределенной энергетике [15–18].

Стоит отметить, что системы диспетчерского управления и сбора данных SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) могут быть недоступны в отдаленных территориях с АСЭС для дистанционного управления. Контроль генерируемой мощности от распределенного ресурса должен выполняться локально и автоматически с помощью надлежащего управления электропотреблением, поскольку невозможность развернуть технику, либо выслать специализированного инженера, ответственного за работу с каждым блоком генерации, вызывает ряд затруднений. На сегодняшний день, проведено много исследований по моделированию энергетических процессов с распределенной генерацией. Большинство работ акцентирует внимание на нагрев аккумуляторов и тепловых насосов [14–18], где были предложены варианты использования дополнительных мощностей, когда генерирование превышает потребление. Аккумуляторный накопитель является перспективным способом хранения энергии, однако, более интересным с точки зрения научно-исследовательской деятельности будет возможность математического моделирования АСЭС с распределенной фотоэлектрической генерацией, когда вся генерируемая энергия расходуется на потребителя от обоих источников.

Кроме того, оптимальные размеры и гибкость в расположении системы фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) были неоднократно оценены с технико-экономической и инженерно-практической точек зрения как для потребителя, так и для генерирующей компании [15].

1.3 Тенденции развития распределенной фотоэлектрической генерации за рубежом

1.3.1 Соединенные Штаты Америки

История надежных стимулов, государственной поддержки в сочетании со сравнительно высокими показателями розничной торговли, прогрессивной и адаптируемой технологией производства конструкций ВИЭ, вывели США на ведущие позиции с точки зрения мощности распределенной фотоэлектрической генерации. Этот рост, а также развитие аккумуляторных накопителей-хранилищ, подъем рынка электромобилей и другие возникающие технологии распределенной энергетики привели к нескольким удачным законодательным актам, вызвавшим шквал предложений и реализаций проектов ВИЭ.

Коллокации государственных и коммунальных программ стимулирования и продолжающаяся дискуссия о ценности и будущей роли распределенной энергетики в США – все это разворачивается на фоне недавнего обновления государственного стандарта развития штата Калифорния, где основными целями ставятся [45]:

1. Развитие и использование ВИЭ до 50% к 2030 году.
2. Сокращение выбросов парниковых газов на 40%, что окажется ниже уровня 1990 года к 2030 году.
3. Применение распределенной энергетики должно помочь сократить загрузку инфраструктурных образований на периферии.
4. Решение проблемы с надежностью сети электроснабжения крупных предприятий штата.
5. Укрепление рыночных позиций, которые направляют коммунальный сектор в сторону получения дополнительных энергоресурсов от возобновляемых источников, что повышает энергоэффективность и спрос распределенной энергетики.

Рост распределенных фотоэлектрических элементов был обусловлен резким падением общей стоимости солнечных модулей и был дополнительно стимулирован снижением потребительских расходов за счет большей доступности и принятия на рынке прав собственности для третьих лиц. Несмотря на быстрый рост распределенных фотоэлектрических и ветроэнергетических генераций, эти ресурсы вносят очень малую часть общего электроснабжения в США. На рис. 3 и 4 изображены последние тенденции принятия решений для распределенных фотоэлектрической и ветровой энергетики [46].

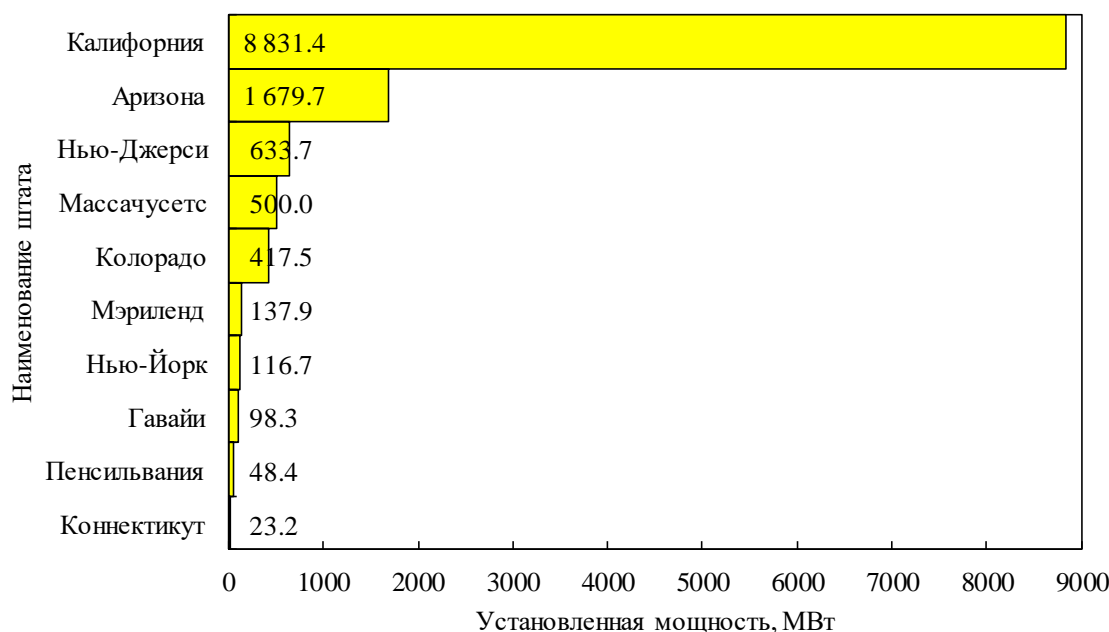


Рисунок 3 – Генерируемая мощность от установленных возобновляемых энергоресурсов за июнь 2017 года

В Калифорнии доминируют солнечные батареи, расположенные на крыше коммунальных секторов, около 40% установленной мощности страны, что во многом связано с традиционными государственными программами стимулирования, такими как «Калифорнийская солнечная инициатива» (California Solar Initiative), а также с розничными ценами на электроэнергию, которые являются одними из самых высоких в стране. Штат Аризона, Нью-Джерси и Массачусетс следуют за Калифорнией, соответственно составляя около 10%, 8% и 7% от общей установленной мощности страны (см. Рисунок 3).

На основании данных Департамента энергетики и управления энергетической политики и системного анализа Соединенных Штатов (U.S. Department of Energy Office of Energy Policy and Systems Analysis) были представлены тенденции развития распределенной энергетики в стране [47]:

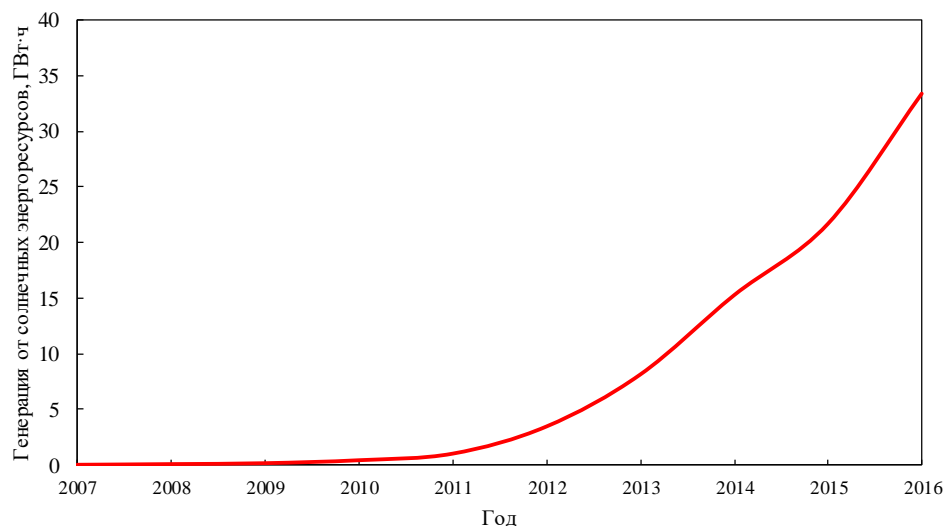


Рисунок 4 – Рост выработки от фотоэлектрической генерации в США [48]

На Рисунке 4 показаны последние тенденции в принятии решений для фотоэлектрической генерации в Соединенных Штатах, где совершенно четко прослеживается ускорение в начале века. В США есть 1721 СЭС, они генерируют 1% электроэнергии страны.

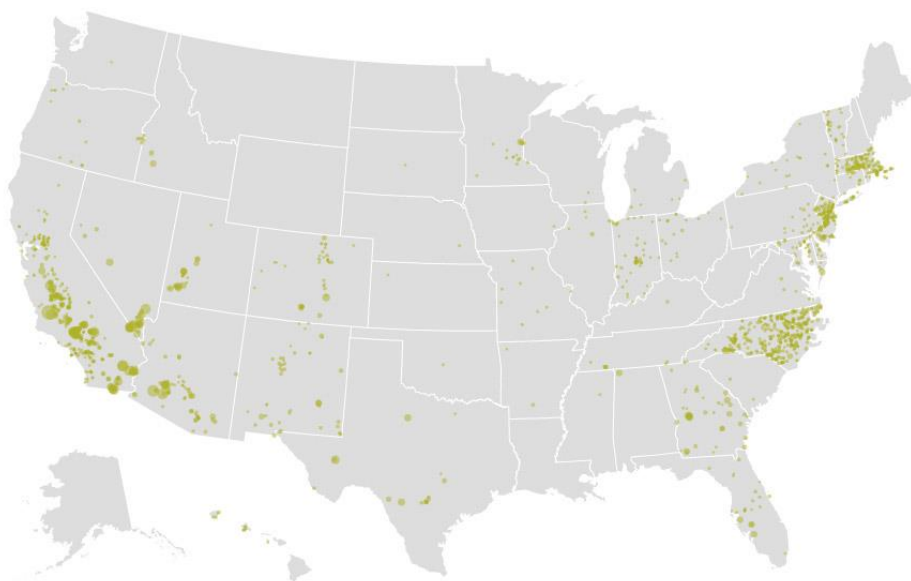


Рисунок 5 – Распределение солнечных электростанции по территории США [49]

1.3.2 Германия

В 2016 году в Германии была установлена новая мощность от фотоэлектрических станций (ФЭС) в размере 1,2 ГВт, что соответствует почти 2% от общей мощности солнечной генерации по всему миру. В немецком законодательстве по возобновляемым источникам энергии EEG (Erneuerbare Energien Gesetz) 2014 и 2017 года, федеральное правительство установило ежегодную цель 2,5 ГВт фотоэлектрической генерации [45].

По экспертной оценке, удовлетворение большинства или всех потребностей Германии в энергии от возобновляемых ресурсов будет достигнуто к 2050 году. Для этого требуется мощность 150–200 ГВт фотоэлектрических систем. Это означает, что в среднем до 4–5 ГВт солнечной генерации необходимо устанавливать ежегодно до 2050 года. Со временем старые фотоэлектрические системы должны быть заменены, но на данный момент замена установок не сыграет большой роли. Это объясняется тем, что целевая мощность в 200 ГВт фотоэлектрических станций не будет достигнута, так как срок их службы составляет около 30 лет. Анализ показывает, что 6–7 ГВт фотогенерации необходимо заменять каждый год. Трансформация всего энергетического сектора на ВИЭ не является целью нынешнего федерального правительства Германии. Предусматривается минимальная доля 80% возобновляемых источников энергии к 2050 году [50].

Более 98% немецких (это более чем миллион) ФЭС подключены к децентрализованной низковольтной сети и генерируют солнечное электричество в непосредственной близости от потребителей. Установки с ФЭП мощностью более 1 МВт составляет всего 15% от общей мощности ФЭС в Германии. Это означает, что передача солнечного электричества происходит преимущественно децентрализованным образом, тем самым ликвидируя какие-либо требования о расширении немецкой национальной сети передачи электрической энергии.

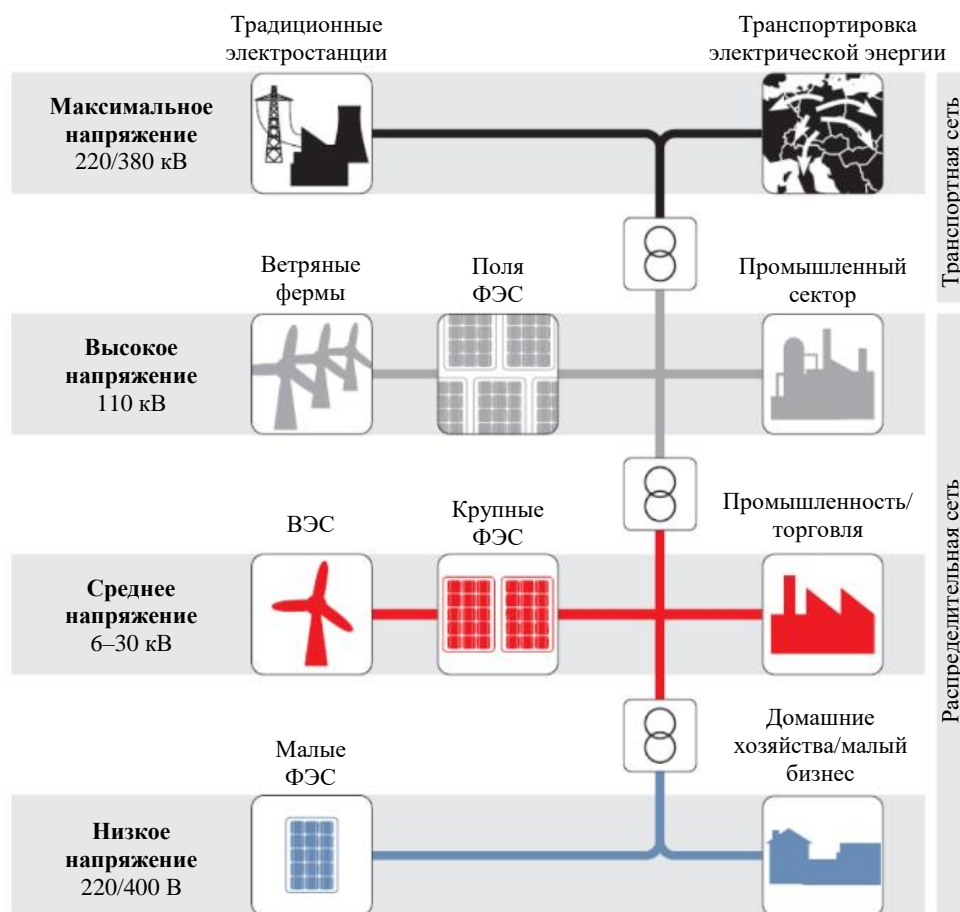


Рисунок 6 – Структура немецкой электросетевой системы [52]

Высокая плотность электростанций в низковольтной секции электросети может привести к тому, что выработка электроэнергии превысит потребление в этом участке сети в дни максимальной солнечной радиации. В этом случае трансформаторы снова подают питание в сеть среднего напряжения. В секциях с высокой плотностью генерации это может подтолкнуть трансформаторные станции к их предельным значениям. Равное распределение СЭС по всем секциям сети уменьшает необходимость расширения системы электроснабжения [53].

По Рисунку 6 можно сделать вывод, что децентрализованные ФЭС хорошо локализованы, тем самым обеспечивая подачу и распределение существующей электрической энергии в сеть. Большие ФЭС небольших заводов в малонаселенных районах требуют, чтобы распределительная сеть и трансформаторные станции были усилены на определенных участках.

Дальнейшее расширение ФЭС должно проводиться с большим вниманием к поставке электроэнергии, чтобы упростить распределение солнечного электричества. Земли Баварии и Бранденбурга имеют в три–четыре раза больше установленной мощности солнечной генерации на одного жителя по сравнению с землями Саарланд, Северный Рейн-Вестфалия, Саксония или Гессен (см. Рисунок 7).

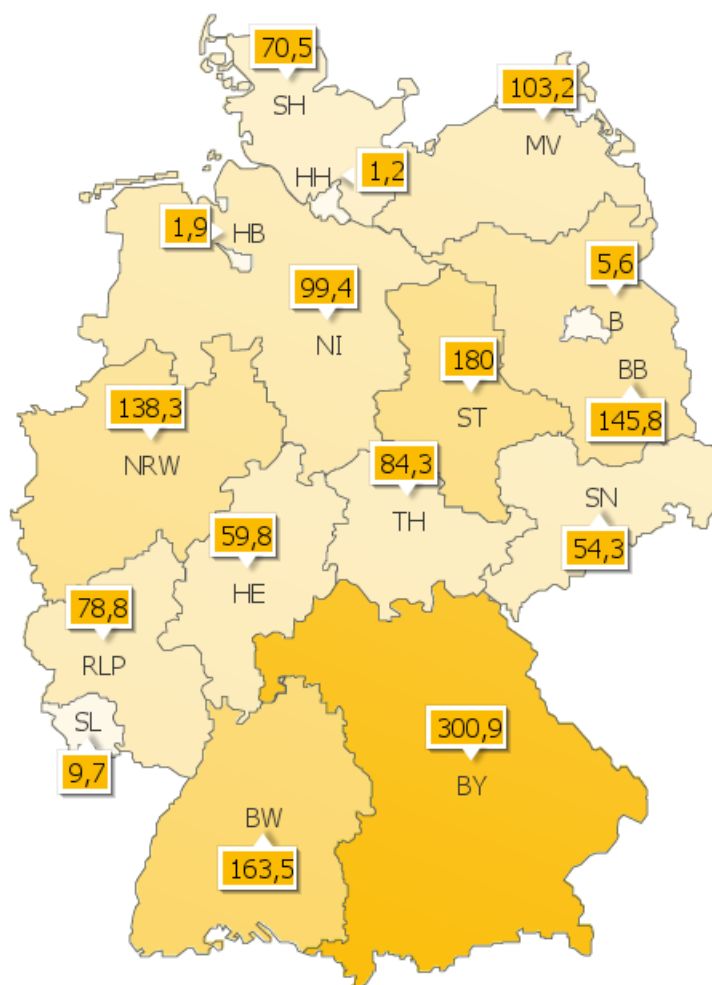


Рисунок 7 – Установленная мощность солнечных электростанций в МВт/пик за 2015 год [50]

Как показано на Рисунке 7, СЭС широко распространены среди шестнадцати земель и не ограничиваются только южными регионами страны. Важно отметить, что в течение первых трех кварталов 2017 года 37,5% энергии Германии было произведено на основе ВИЭ. По состоянию на конец 2016 года доля ВИЭ составила 34%. Объем производства возобновляемой энергии за этот период достиг 151,6 ТВт·ч.

1. Энергия ветра вырабатывала 16,4% электроэнергии в Германии (66,6 ТВт·ч). Тем не менее ветер является крупнейшим источником энергии в стране после бурого угля.

2. Солнечная энергия сгенерировала 8,7% – больше, чем генерация газа (8,4%).

На основании данных Фраунхоферского института солнечных энергетических систем (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE) были представлены тенденции развития энергетики в Германии [51]:

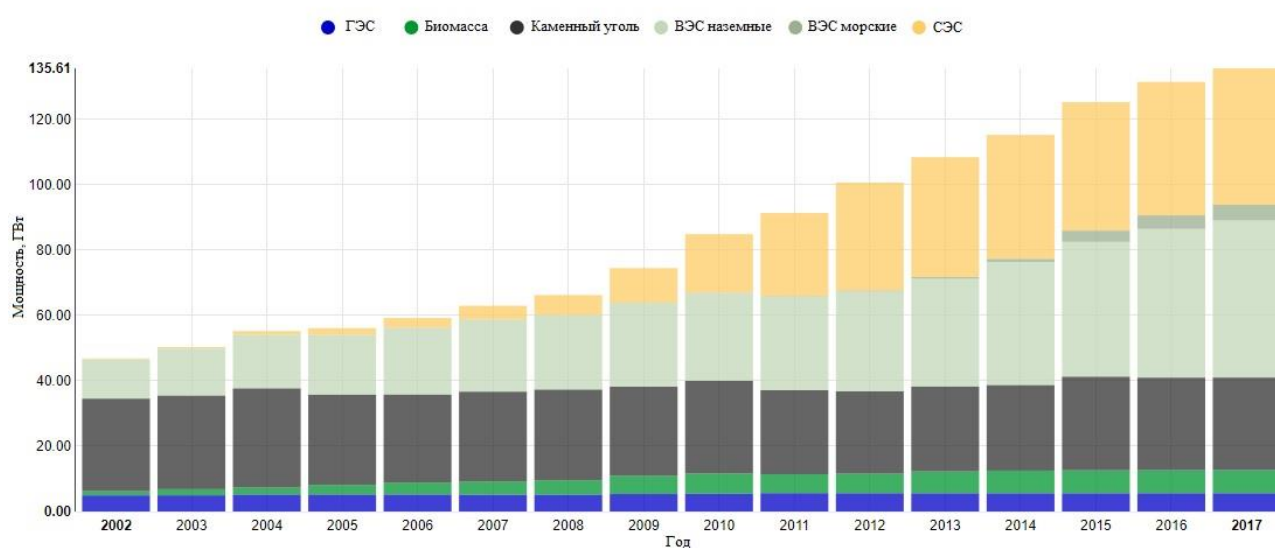


Рисунок 8 – График установленных мощностей производства электроэнергии [51]

Уголь все еще доминирует в энергетическом секторе Германии, что отрицательно сказывается на способности страны выполнять свои климатические обязательства. 25% электроэнергии, произведенной на буром угле, и 15,9% на черном угле. В целом, это немного меньше, чем доля угля в 2016 году. В соответствии с немецким законодательством по ВИЭ в 2020 году ВИЭ должно производить 40–45% электроэнергии в стране. Согласно [53], эта цель, вероятно, будет достигнута еще раньше.

3.1.2 Чешская Республика

Энергетическая промышленность Чешской Республики охватывает как производство, так и распределение всех видов энергии, включая добычу

некоторых полезных ископаемых и использование таких источников энергии как уголь, природный газ, уран и т.д. Обсуждение среди политиков, бизнесменов и других лиц, принимающих решения связанные с энергетическим сектором, охватывают темы устойчивости, энергетического баланса, автономности, регулирования, эффективности и использование возобновляемых источников энергии. Чешская Республика является одним из крупнейших экспортеров электроэнергии в Европейском союзе, поэтому энергетический сектор, особенно рынок электроэнергии, играет важную роль в чешской экономике, а также в энергетической безопасности Центральной Европы [55].

В Чешской Республике генерация электроэнергии обеспечивается несколькими источниками [55]:

1. Тепловые электростанции (ТЭЦ): тепловые электростанции являются крупнейшими производителями энергии в Чешской Республике. Они расположены в регионах с крупными месторождениями угля (особенно бурого угля и каменного угля) и близких к рекам. Самые крупные из них расположены недалеко от городов Соколова, Моста, Остравы, Мельника, Хвалетице или Велке Опатовице.

2. Атомные электростанции (АЭС): атомные электростанции являются вторым по величине производителем электроэнергии. Две электростанции Дукованы и Темелин являются предметом горячих дискуссий о завершении или продлении срока их службы. На данный момент актуальным является вопрос увеличения установленной мощности в Чешской Республике.

3. Гидроэлектростанции (ГЭС) (в том числе насосные гидроэлектростанции): традиционно гидроэлектростанции являются стабильной частью энергетического сектора Чехии, потому что чешская сельская местность очень богата источниками воды. Самые крупные гидроэлектростанции расположены на каскаде плотин на реке Влтава (Липно, Камык, Слапы, Орлик, Вране).

4. Комбинированные и газовые электростанции: за последние десять лет этот источник производства электроэнергии удвоил свою долю в чешском энергетическом комплексе. Комбинированный цикл в процессе производства повышает эффективность переработки источников энергии. Вот почему несколько крупных проектов таких электростанций уже активно эксплуатируются (Почерады и Мохов).

5. Фотоэлектрические станции: рост фотоэлектрических электростанций связан с государственным вмешательством в производство энергии (субсидированные цены), т. е. с целью диверсификации производства энергии в сторону ВИЭ. Среди почти тридцати тысяч электростанций самые крупные расположены в Северной Богемии (Ралско), Центральной Чехии (Вепрек) и Южной Богемии.

6. Ветроэлектростанции (ВЭС): энергия, производимая ветряными электростанциями, покрывает незначительную долю потребления энергии в Чехии. Большинство ветряных электростанций расположены в горных хребтах в северной части государства, таких как Есеники, Орлицкие горы.

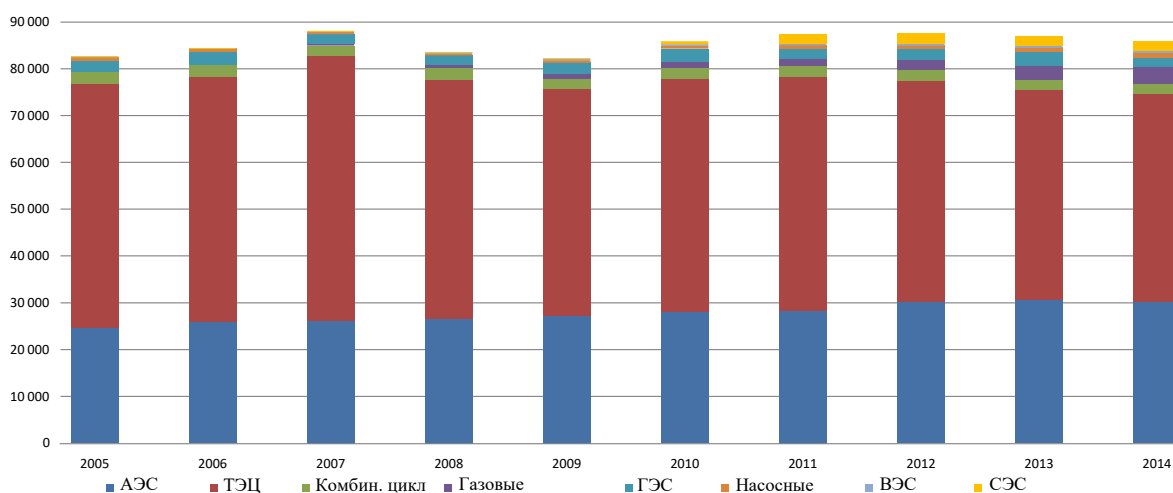


Рисунок 9 – График участников производства электроэнергии в ГВт·ч [57]

Принимая во внимание долю производства электрической энергии, ТЭЦ и АЭС значительно доминируют. В 2013 году валовое производство электроэнергии достигло в общей сложности 87 065 ГВт·ч, тогда как 51,4% – на

ТЭЦ и 35,3% – на АЭС. Остальные источники охватывали около 13% производства электроэнергии.

Программа поддержки возобновляемых источников энергии первоначально была основана на законодательстве, предложенном в 2003 году. Государственная поддержка электроэнергии, производимой из возобновляемых источников энергии в Чешской Республике, была провозглашена специальным Законом под номером 180/2005, в которой гарантировалась финансовая поддержка энергии ветра, солнечной энергии, геотермальной энергии, водной энергии, биомассы и биогаза. Положения объявили значительные субсидии, особенно в 2009 и 2010 годах, что вызвало строительство тысяч электростанций и вызвало угрозу более высоких цен для потребителей электроэнергии в штате на десятки процентов.

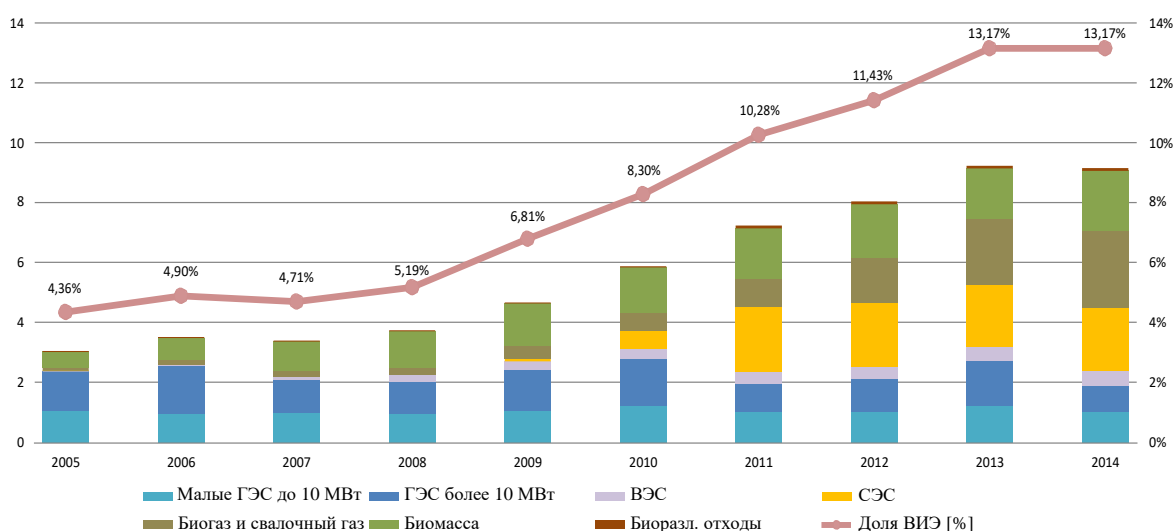


Рисунок 10 – Производство электроэнергии из ВИЭ и его доли в валовом потреблении [55]

В период с 2008 по 2010 год резкое снижение цен на фотогальванические панели (возврат инвестиций с включенной поддержкой сократился с законодательно рассчитанных 15 лет до 6 или 7 лет) вызвал резкое увеличение строительства фотоэлектрических электростанций [57].

На основании данных технологического факультета Технологического института энергетики г. Брно (Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojní Energetického ústavu), в общей сложности доля возобновляемых источников

энергии в конце 2013 года увеличилась до 13,17%. В качестве основного фактора нужно отметить рост фотоэлектрических и биогазовых источников. Что касается производства возобновляемой электроэнергии, то в 2013 году она произвела более 9,24 ТВт·ч в год. Важнейшая часть этого показателя покрывается за счет гидроэнергетики (почти 30% от производства ВИЭ), биогаза и свалочного газа (более 24%), ФЭП (более 22%) и биомассы (около 18%) [58].

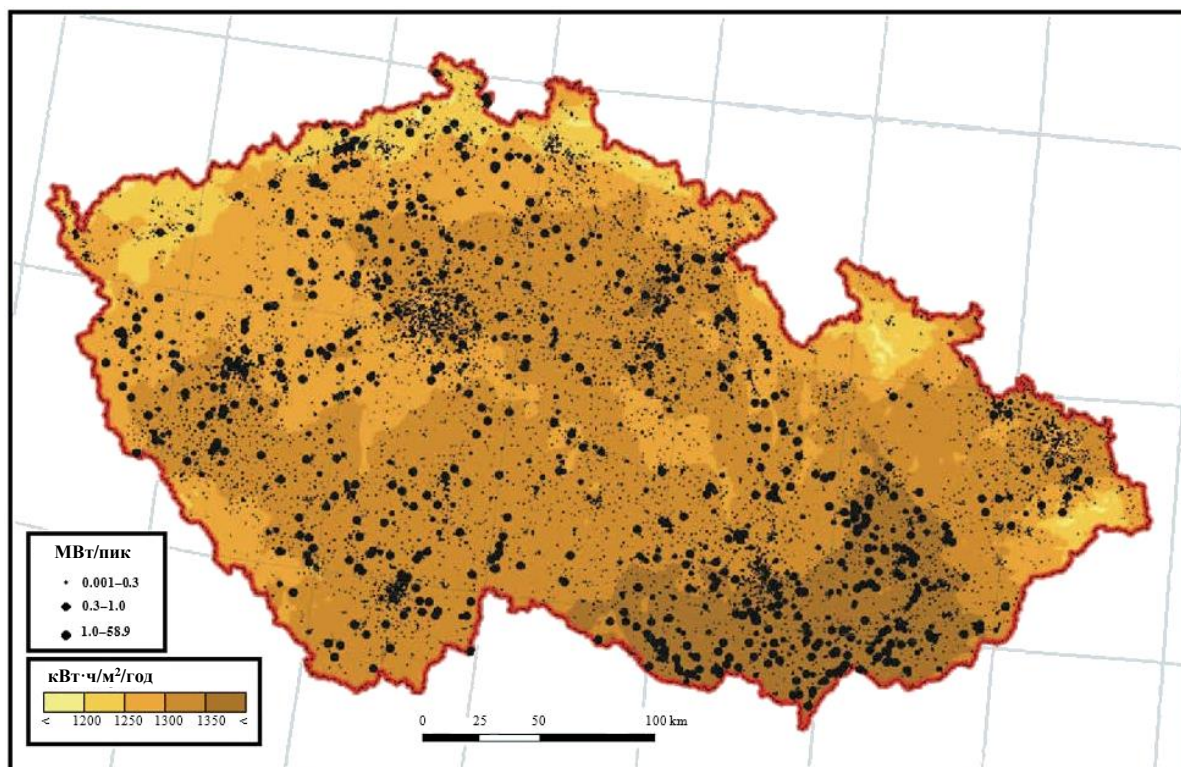


Рисунок 11 – Карта распределения солнечной радиации и распределения СЭС за 2013 год [58]

Согласно Рисунку 11, фотоэлектрические установки широко распространены по всей территории Чешской Республики. Южная Богемия является наиболее распространенной областью эксплуатации фотоэлектрических установок, где мы можем наблюдать высокую чувствительность к инсоляции на уровне 1300–1350 кВт·ч/м² в год.

3.1.2 Китайская Народная Республика

За последнее время, энергетическая политика Китая способствует использованию возобновляемых источников энергии и повышению

энергоэффективности в качестве средства смягчения воздействия на окружающую среду, повышения безопасности поставок электрической энергии и обеспечения экономической конкурентоспособности среди других государств. В результате данного вектора развития, уровни проникновения распределенной генерации в электрических сетях быстро растут и, как ожидается, будут играть более важную роль в энергетике страны [56].

Несмотря на некоторую умеренность в прогнозируемом экономическом росте, Китай остается одной из самых быстрорастущих экономик в мире. В результате его общее производство электроэнергии почти удваивается с 4,8 трлн. кВт·ч в 2012 году до 9,4 трлн. кВт·ч в 2040 году при среднегодовом темпе роста на 2,5%. Влияние продолжающегося быстрого экономического развития Китая на окружающую среду стало главной проблемой среди разработчиков экологической политики в Китае, а также для широкой общественности. В частности, недавно Китай представил ряд предложений, направленных на решение острых проблем, связанных с качеством воздуха. В совместном заявлении в ноябре 2014 года как Китай, так и США взяли на себя обязательство предпринять действия, направленные на обеспечение долгосрочного сокращения выбросов, а Китай нацелился на сокращение выбросов CO₂ к 2030 году. Китай движется, чтобы производить больше электроэнергии от ядерной энергии, ВИЭ и природного газа для решения экологических проблем и диверсификации своей топливной смеси для производства электроэнергии в сторону источников энергии с более низким или нулевым выбросом парниковых газов [56].

В июне 2015 года Китай изложил конкретные шаги, необходимые для снижения уровня выбросов CO₂, начиная с 2030 года. Политика правительства «Предполагаемых национальных взносов» INDC (Intended Nationally Determined Contributions) включает в себя следующие энергетические цели для Китая:

1. Более низкая интенсивность углерода (CO₂ на единицу ВВП) на 60–65% по сравнению с уровнями 2005 года.

2. Необходимо увеличить долю невоенного топлива в первичной энергетической смеси примерно до 20%.

Для достижения этой цели необходимо будет построить к 2030 году 800–1000 ГВт генерирующих мощностей от ВИЭ, что даст сравнительный ориентир для дальнейших прогнозов. В последние годы стоимость возобновляемых технологий продолжает снижаться, причем наибольшее снижение затрат наблюдается для солнечных технологий. Однако цели политики в области чистой энергии также играют важную роль в принятии возобновляемых источников энергии в Китае. Цели политики в области возобновляемых источников включают в себя сформулированные конкретные цели на национальном уровне, официально включенные в различные пятилетние планы: в двенадцатый пятилетний план (2011–2015 гг.) включена цель по увеличению немошных источников энергии (включая гидроэнергетику, ядерную и возобновляемую энергию) до 11,4% от общего потребления энергии (по сравнению с 8,3% в 2010 году). Кроме того, в плане предусматривается 15% общая цель для доли возобновляемой энергетике от общего производства электроэнергии в 2020 году [60].

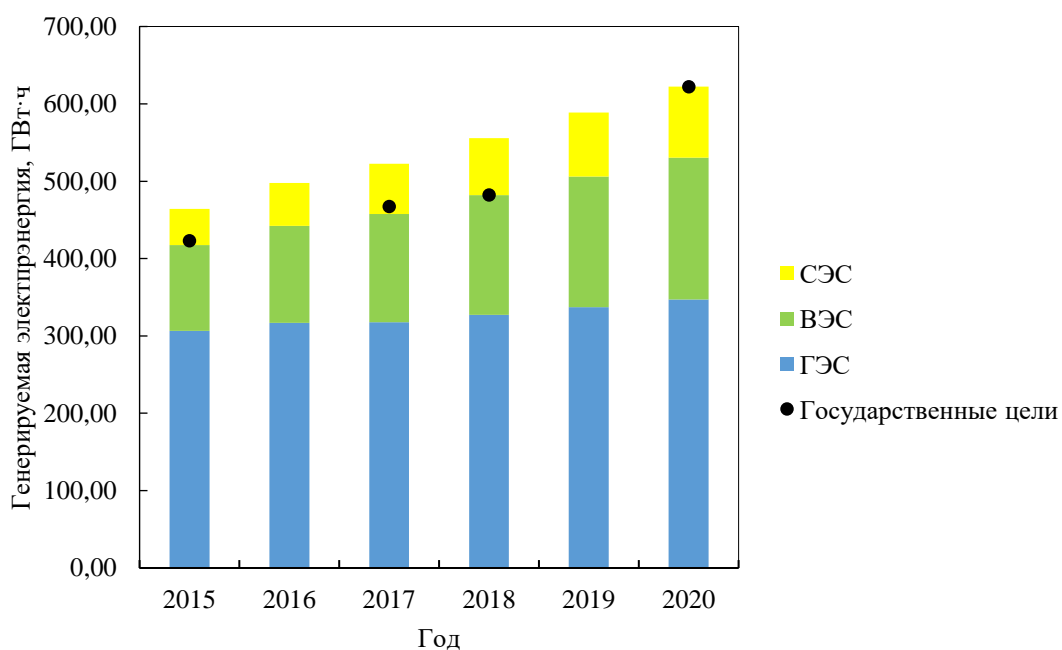


Рисунок 12 – Прогнозируемая генерация электроэнергии от ВИЭ [59]

На Рисунке 14, по реализуемым пятилетним планам, отражается сильный рост как установленной ветровой, так и солнечной генерирующих мощностей, поддерживающие прогнозируемую тенденцию в использовании ВИЭ в Китае. Установленная солнечная мощность увеличится с 3 ГВт в 2012 году до 184 ГВт в 2040 году, а мощность ветровой энергии увеличится с 61 ГВт в 2012 году до 350 ГВт в 2040 году.

Можно сделать вывод, что в Китае развитие распределенной генерации может эффективно смягчать текущие проблемы энергоснабжения и окружающей среды, где Китай имеет потенциально широкий рынок с множеством новых энергетических и возобновляемых источников энергии. Есть много преимуществ, если развивать распределенное поколение в Китае, что будет способствовать разработке соответствующей политики для поощрения и популяризации использования технологии распределенной энергетики: распределенная энергия ветра, распределенная фотоэлектрическая, малая гидроэнергетика, выработка энергии биомассы, малые газовые станции и т.д. [64].

Электросети распределенной фотоэлектрической системы в Китае находится на начальной стадии развития. Стандарты распределенной энергетики малочисленны, существующие документы, открывающие доступ к мощности от ФЭП в основном имеют [64]:

1. GB/T 19939–2005 «System technology requirements of PV on-grid».
2. GB/T 20046–2006 «PV system grid interface characteristics».
3. SJ/T 11127–1997 «Voltage protection guide for PV power system».
4. «National grid company technology regulations of PV power station grid access».
5. Q/GDW 617–2011 «PV power plants connected to the grid technology requirements».
6. «Technology codes for the remote monitoring of distributed PV».

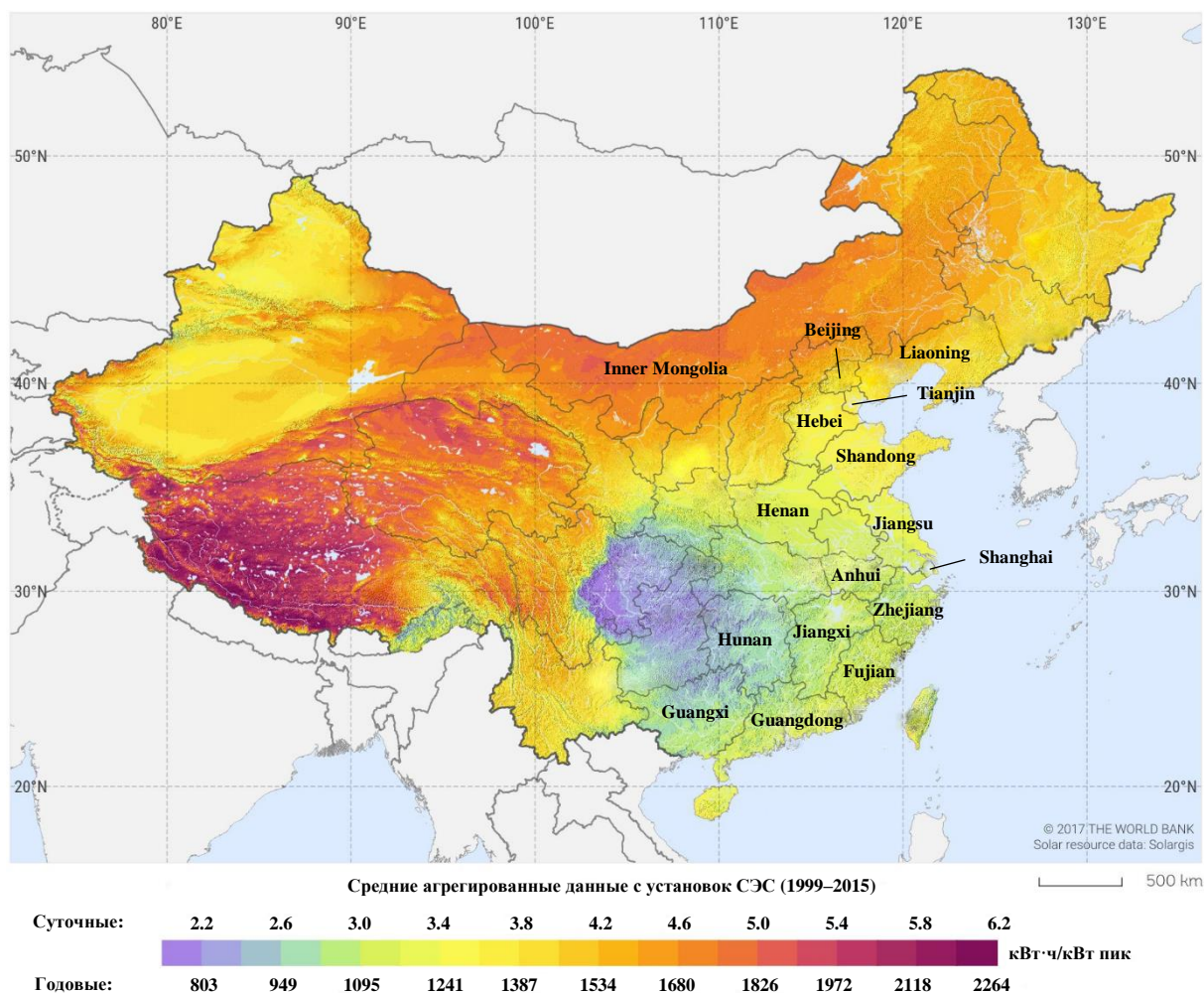


Рисунок 13 – Фотоэлектрический потенциал мощности в Китае [61, 62]

Как видно из Рисунка 14, производительность распределенных ФЭС систем с 2010 по 2014 год увеличилась. Необходимо отметить, что доля распределенных ФЭС в общей суммарной емкости СЭС составляла 35,4%, 15,2% и 16,7% соответственно в 2012, 2013 и 2014 годах, но ниже ожидаемых. В 2014 году количество новых распределенных фотоэлектрических установок было всего лишь 2,1 ГВт, что значительно отстает от целевого показателя 8 ГВт, установленного правительством в начале 2014 года [56]. Наиболее эффективными провинциями с точки зрения совокупной распределенной установки являются Чжэцзян, Цзянсу и Шаньдун (см. Рисунок 13 и Таблицу 1), которые имеют примерно 73% от общей мощности СЭС по всей стране.

Таблица 1 – Оперлируемая и новая установленная мощности распределенных ФЭС систем за 2014 год [56]

Провинция	Мощность, МВт	
	Оперлируемая	Новая
Цзянсу	850	570
Чжэцзян	700	270
Шаньдун, Аньхой	380	180
Гуандун	500	200
Цзянси	260	150

Развитие Китая распределенных систем ФЭС обеспечивает полезный опыт и для других стран, которые также способствуют распределенной политике ФЭС. Например, иностранные акционеры и инвесторы ФЭС-проектов должны более активно участвовать в разработке политики РГ. У них есть соответствующие данные о ситуации с РГ, в отличие от директивных органов относительно затрат и реализации проектов. Контексту каждой отдельной страны следует уделять повышенное внимание. В Китае с государственными субсидиями внутренняя норма доходности ВНД (Internal Rate of Return) проекта РГ теоретически привлекательна 10,2% при инфляции 3% [63]. Однако, учитывая все препятствия, такие как проблема владения зданием для установок ФЭС на крыше, ВНД распределенных проектов ФЭС может быть менее привлекательным, чем ожидалось для инвесторов [64].

1.4 Распределенная генерация в России

Традиционно сложившийся уклад образования структуры работы топливно-энергетического комплекса (ТЭК) России за более чем столетнюю историю сформировал национальное виденье РГ. Распределенной генерацией можно считать те объекты генерации, которые находятся вблизи конечного потребления, вне зависимости от того, кто является их владельцем. На сегодняшний день в России можно выделить три категории генерирующих мощностей, которые подпадают под это широкое определение [26]:

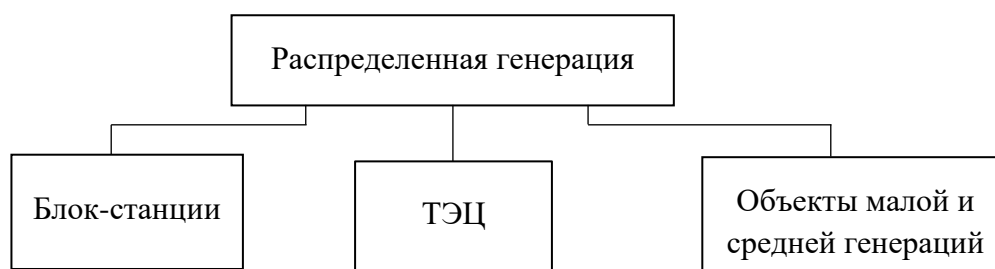


Рисунок 14 – Блок-схема структуры РГ России

1. Блок-станции, источник электрической или тепловой энергии, расположенный на территории или в непосредственной близости от промышленного предприятия. Данная станция, как правило, принадлежит владельцам данного предприятия на правах собственности или ином законном основании, например, аренда.

2. ТЭЦ и централизованное теплоснабжение населенных пунктов. Нет никаких сомнений в том, что комбинированное производство электроэнергии и тепла повышает коэффициент использования топлива (КИТ) в среднем на 30%. Данный факт был отмечен еще во времена советской эксплуатации ТЭЦ. На фоне этого эффекта существенные затраты и препятствия при проектировании и эксплуатации теплоэлектроцентралей становятся приемлемыми. Это одна из причин, по которым когенерация широко пропагандируется и поощряется сейчас в Европе.

3. Объекты малой и средней генерации, в числе которых газотурбинные и газопоршневые станции, а также пока еще малочисленные в России электростанции на основе ВИЭ.

В России, несмотря на рост темпов строительства объектов распределенной генерации, процесс фокусирования сил не находит должного места в перспективном планировании развития системы. Еще нет осознания того вклада, который распределенная генерация может внести в общее развитие системы и ее модернизацию, и нет разработанной государственной политики на этот счет. При разработке такой политики важнейшим положением должно стать требование проанализировать и при необходимости пересмотреть философию и технологию перспективного планирования развития системы с учетом

распространения распределенной генерации, создания микросетей и внедрения технологий интеллектуальных сетей [26].

Основные причины привлекательности РГ:

1. Исчезает потребность в реконструкции или строительстве новых инфраструктур.

2. Наличие источников напряжения в непосредственной близости от нагрузки увеличивает надежность энергоснабжения, способствует поддержанию должных уровней напряжения в сети и снижает риск потери устойчивости.

3. Снижаются потери электрической энергии в сетях и перетоки реактивной мощности.

4. Финансовые риски, связанные с объектами малой и средней генерации, намного ниже, чем для объектов с большой установленной мощностью.

5. Предсказуемость затрат на энергоснабжение.

6. Повышение надежности энергоснабжения для владельца собственного источника электроэнергии, ведь большинство перерывов в энергоснабжении связано с нештатными ситуациями в сетевом хозяйстве.

РГ, чаще всего, представляет собой новое оборудование, импортируемое из-за границы, с новыми динамическими характеристиками и возможностями управления. Влияние РГ на качество электричества по уровням напряжения, а также на генерацию высших гармоник в системе также непредсказуемо. Подключение источников РГ к распределительной сети увеличивает токи короткого замыкания, что может потребовать замены коммутационных устройств, изменений в настройках защиты и т. д. Внешний вид РГ усложняет оперативное диспетчерское управление, а также систему релейной защиты и автоматизации, аварийную контроль.

Россия – одна из стран мира с крупнейшими районами, не охваченными магистральными линиями электропередач. Наиболее распространенными мелкосерийными коммунальными предприятиями в России являются ДЭС.

Существуют определенные преимущества производства энергии от дизельного топлива, но недостатки также значительны: высокий уровень потребления ископаемого топлива при производстве электроэнергии в 1 кВт·ч, загрязнения и т. д. Согласно Рисункам Б.1 и Б.2 (Приложение Б), нет сомнений в том, что централизованная электрическая сеть имеет корреляцию с районами повышенной плотности населения России. Южные регионы России более привлекательны для жизни и имеют исторические предпосылки: лучшие возможности для сельского хозяйства, близость к другим странам, лучшие условия окружающей среды. Однако, не смотря на достаточно объемный список недостатков РГ в сравнении с централизованным электроснабжением, во многих странах формируется тренд пошагового, либо регулируемого законодательными актами перехода от централизованной энергетики к гибкому варианту – объектам распределенной генерации. Нужно отметить, что РГ может быть полезна в случаях, где централизованное электроснабжение никак не может оказать должного с точки зрения экономического и технического вклада в развитие ТЭК государства [20].

В нашей стране имеются конкретные области децентрализованного способа энергообеспечения: Дальний Восток, Арктическая зона, районы Крайнего Севера и Сибири. В данных регионах уже внедрены и успешно оперируют объекты РГ, и они могут послужить отправными точками роста в сфере объектов малой генерации децентрализованного электроснабжения.

Одним из толчков развития, бесспорно, послужит Северный морской путь (СМП) – кратчайший морской путь между Европейской частью России и Дальним Востоком, исторически сложившаяся национальная единая транспортная коммуникация Российской Федерации в Арктике. СМП проходит по морям Северного Ледовитого океана (Баренцево, Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское) и частично Тихого океана (Берингово). Расстояние от Санкт-Петербурга до Владивостока по Северному морскому пути составляет свыше 14 тыс. км (через Суэцкий канал – свыше 23 тыс. км). СМП

обслуживает порты Арктики и крупных рек Сибири (ввоз топлива, оборудования, продовольствия, вывоз леса, природных ископаемых).

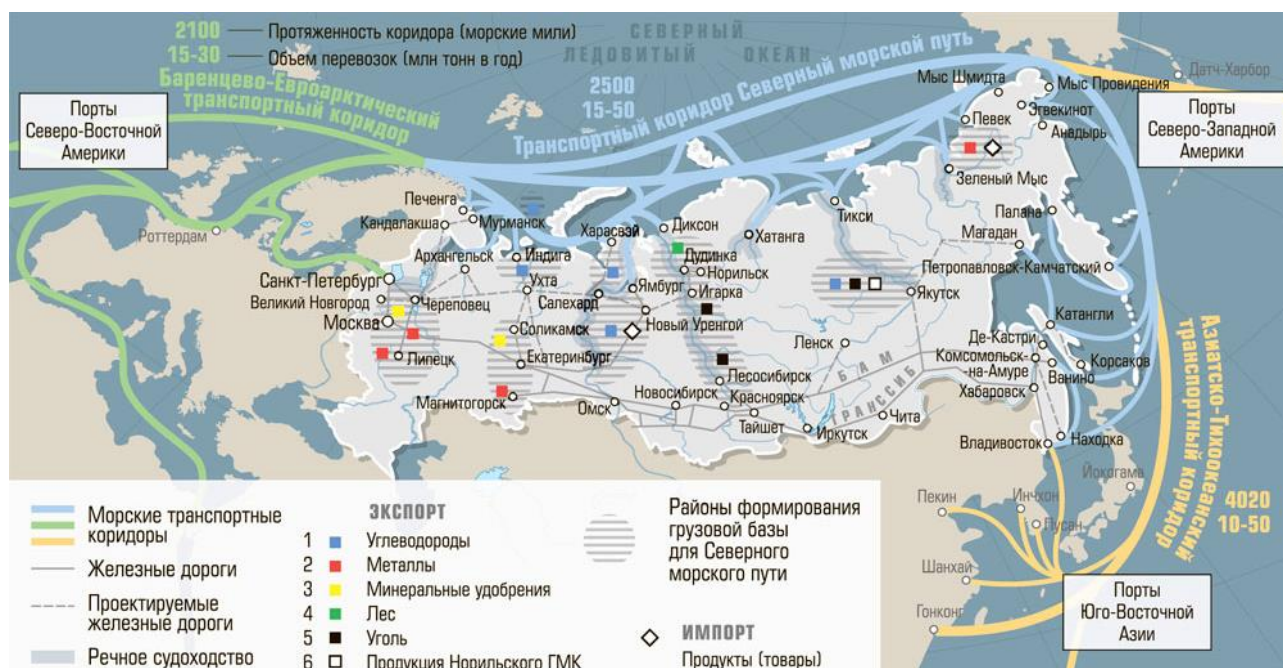


Рисунок 15 – Российский транспортный коридор Северный морской путь [30]

Арктика привлекает многие страны богатыми запасами газа и нефти. Таяние льдов и общее потепление, по прогнозам учёных, могут сделать Северный Ледовитый океан оживлённой транспортной магистралью между Европой, Азией и Америкой [30]. Также, перспективы пиратских нападений на суда, следующие южными маршрутами, повышают интерес судовладельцев к арктическим трассам. Однако СМП сможет конкурировать с южными маршрутами только при условии, если он будет экономически выгоден, и его инфраструктура обеспечит максимальное снижение дополнительных затрат при плавании в арктических льдах.

Существует несколько основных проблем, связанных с энергетической инфраструктурой Северного морского пути, среди которых:

1. Адаптация работы ветровых и фотоэлектрических установок в арктическом климате.

Основным препятствием развития ветроэнергетики является трудность работы в условиях низких температур [31]. Как следствие, имеется повреждение генерирующего оборудования.

2. Формирование инфраструктуры для работы гибридных комплексов трех типов замещения [31]:

Для каждой категории гибридных схем замещения электростанций существует ряд проблем, связанных с организацией автоматизированных комплексов и систем управления с ростом установленной мощности установок.

3. Формирование собственного производства генераторов для ветровых турбин и СЭС на территории Российской Федерации.

Перспективным является широкомасштабное использование электростанций ВИЭ для электроснабжения, нефтегазового комплекса, железнодорожного и автомобильного транспорта и сельского хозяйства [32]. Необходимость развития инфраструктуры производства и обслуживания для ветроэнергетики и фотоэлектрических систем является одним из важных векторов. В настоящее время предприятий местного производства энергии на основе ВИЭ в России недостаточно.

4. Проблема использования нефтегазодобывающего оборудования на основе традиционных технологий вдоль района Северного морского пути.

В связи с тем, что Северный Ледовитый океан является особо охраняемым объектом, использование компонентов, содержащих радиоактивные элементы, запрещено. Речь идет об оснащении практически всех нефтедобывающих скважин многофазной технологией расходомеров на основе VХ (радиоактивное измерение) [33].

Характерными особенностями использования ВИЭ в северных и отдаленных районах для энергии ветра и мощности фотоэлектричества являются следующие [31]:

1. Надежная работа при чрезвычайно низких температурах (-40/-50 °С).
2. Установка без строительной техники.
3. Простая и надежная конструкция.
4. Наличие независимой экспертизы результатов испытаний.

Распределенная генерация на основе ФЭС может обеспечить поддержку системы в чрезвычайных ситуациях и предотвратить их возникновение или уменьшить количество повреждений. В результате тарифная нагрузка на потребителей, обслуживаемых энергосистемой, снижается из-за частичной замены дизельного топлива солнечной энергией. Кроме того, благодаря диверсификации систем с ДЭС с помощью СЭС, финансовые риски, связанные с объектами малых и средних объемов производства электрической энергии, значительно ниже.

Иркутская область является федеральным субъектом России. Он расположен в юго-восточной части Сибирского федерального округа. Его административным центром является город Иркутск. По состоянию на 2017 год население Иркутской области 2 408 901 (1,64% населения России) [34]. Иркутская область является крупным субъектом Российской Федерации, занимая площадь 774 846 км² (4,52% территории России). В Иркутской области есть несколько широко применяемых видов энергоресурсов, таких как гидроресурсы, нефть, газ и уголь. Гидроресурсы и уголь наиболее широко используются в производстве электрической и тепловой энергии для центральной и южной частей Иркутской области. Как правило, данные энергоносители нашли место применения в отдаленном севере и в изолированных районах, где используются дорогие нефтепродукты, так как это простой и надежный способ получения электроэнергии. Например, надежное и дорогостоящее энергоснабжение в изолированных населенных пунктах обеспечивается небольшими котельными и ДЭС, которые являются, к сожалению, относительно устаревшими. Эти устаревшие технологии являются очень дорогостоящими с точки зрения транспортировки топлива и текущей

выработки энергии. Необходимая поддержка на обслуживание и генерацию электрической энергии предоставляется региональным бюджетом для конкретного муниципалитета [36].



Рисунок 16 – Иркутская область (красная) и село Токма (темный круг) [34]

Село Токма с населением около 75 человек является одним из 361 населенного пункта Иркутской области. В этой деревне есть некоторые препятствия для стабильного и надежного электроснабжения и повседневной жизни. В летнее время, каждые две недели, вертолет доставляет единицы необходимых товаров, зимой – транспорт добирается по зимней дороге. Местными жителями являются русские и эвенки. Вторая этническая группа – уникальный этнос коренных народов этой области. Эвенки обладают оригинальной средой обитания, традиционными ремеслами и обычаями, а также уникальными национальными чертами характера – важно сохранить и поддерживать эту малочисленную группу народностей [35]. Основное занятие местных жителей – охота и рыболовство.

Согласно программе полного развития коммунальных инфраструктурных систем муниципалитета Непа на 2012–2015 годы, село Токма имеет:

Таблица 2 – Описание условий системы электроснабжения в селе Токма [38]

ДЭС, кВт		Длина линий электропередачи, м	
Неудовлетворительное состояние	Удовлетворительное состояние	Неудовлетворительное состояние	Удовлетворительное состояние
ДЭС – 1 (30)	ДЭС – 2 (60)	3000	1000

В 2010 году произошло наводнение, в результате которого был разрушен один блок ДЭС, сельская школа и несколько домов [35]. Кроме того, в том же году Иркутская нефтяная компания решила открыть новую нефтяную скважину вблизи села Токма [37]. Климатические трудности, неудовлетворенные условия сгенерированного оборудования, нетранспортные условия, поддержка малочисленной этнической группы жителей, план развития региона и т. д. – все эти обстоятельства вынуждают находить решение в надежной и экономически эффективной форме системы электроснабжения. Для этих изолированных зон существуют два пути решения: централизованная система энергоснабжения или создание распределенной системы на основе местных ресурсов.

Несмотря на то, что строительство линий электропередачи будет обеспечивать высокую надежность, в большинстве случаев данный вариант экономически невыгоден. Причина кроется в высоких издержках строительства. Для некоторых сел с населением 100–300 жителей требуется линия электропередачи 110 кВ [36]. Возможен вариант со строительством линий электропередач напряжением до 35 кВ. Для этого случая должно существовать разумное расстояние от них до линий электропередачи 110–500 кВ. Из ближайшего города Усть-Илимска с централизованным энергоснабжением – 270 километров. Факт наличия потерь электроэнергии при транспортировке на такое расстояние ликвидирует шанс реализации данного концепта. При передаче электроэнергии через высоковольтные сети теряется около 9% передаваемой энергии. В распределительных сетях потребителей теряется еще 3–4%, т. е. общие потери энергии составляют 12–13% [39]. В этой ситуации есть второй вариант: создание и развитие местных современных и высокоэффективных

источников энергии в отдаленных районах Иркутской области с использованием местных источников энергии.

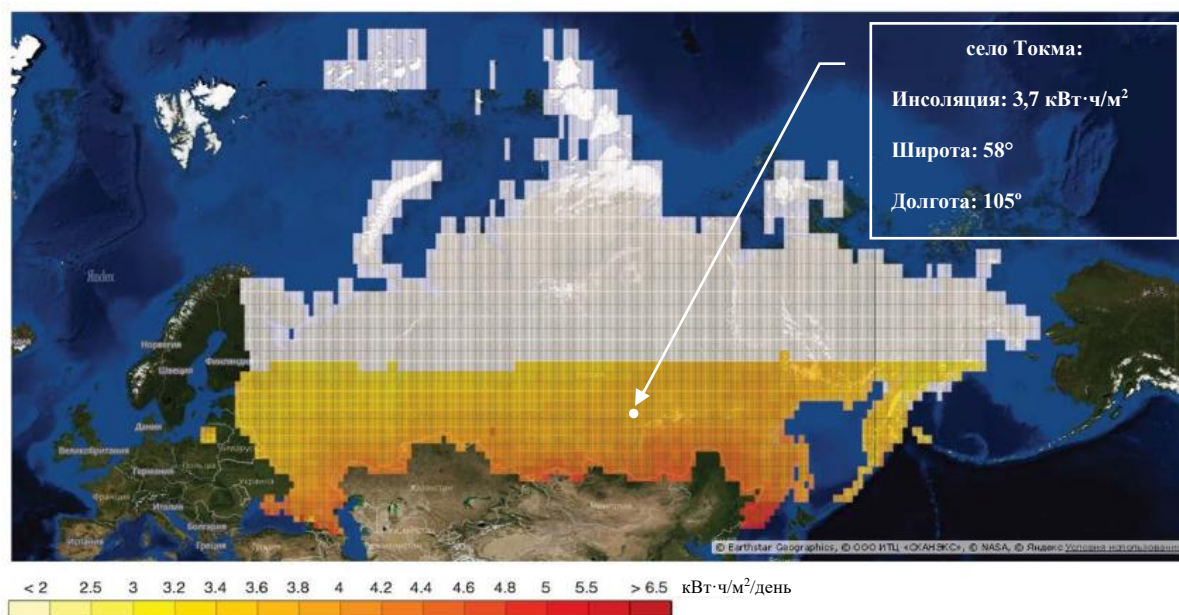


Рисунок 17 – Среднее за год суточное количество солнечной радиации, достигающее оптимально ориентированной поверхности [41]

Необходимо отметить, что в условиях северных и отдаленных районов использование микро-гидроэлектростанций осложняется климатическими трудностями. Микро-гидростанции не требуют значительных затрат, но сезонные колебания речного течения, вплоть до полного замерзания в зимний период, когда максимальные электрические нагрузки, можно рассматривать в исключительных случаях для центральных и южных районов Иркутской области. Использование геотермальных тепловых электростанций в Иркутской области не представляется возможным из-за отсутствия горячих источников. Потенциал использования древесной биомассы в Иркутской области для замены нефтепродуктов в местной системе теплоснабжения более чем достаточен. Однако, это возможно в районах с высоким уровнем потребления нефтепродуктов в теплоэнергетике (город Иркутск и Ангарский муниципальный район). Их замещение требует использования лесных ресурсов из соседних транспортных районов с экономически обоснованной точки зрения [40].

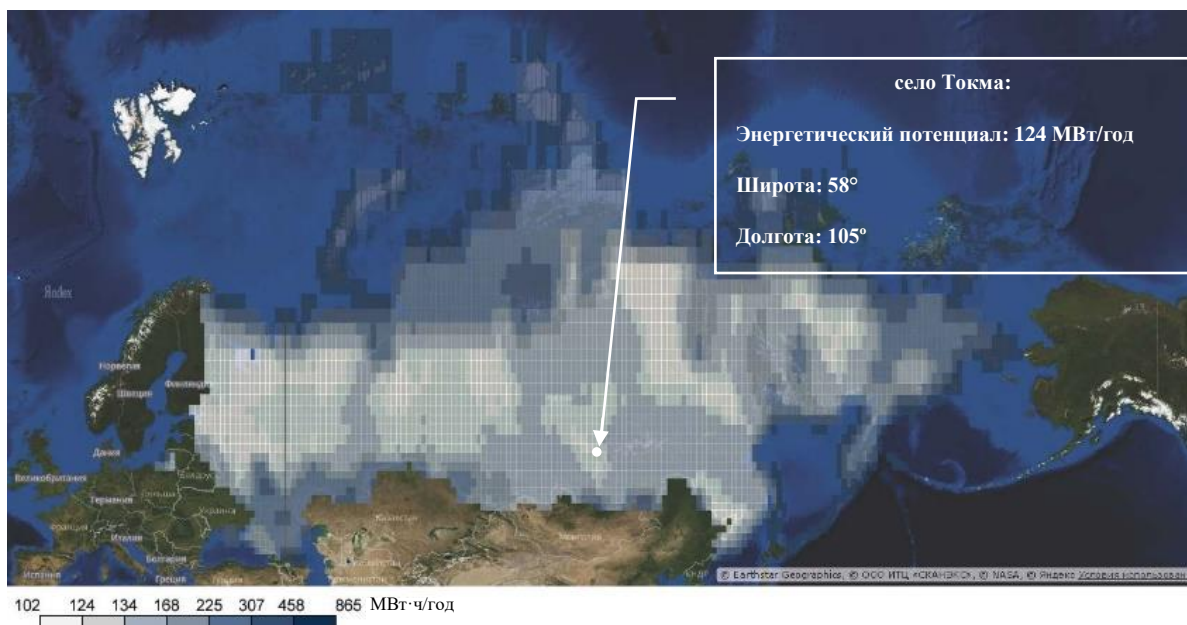


Рисунок 18 – Годовой потенциал энергии ветра на высоте 30 метров [41]

Технический потенциал солнечных и ветровых ресурсов довольно высок [36]. Как показано на Рисунках 17 и 18, село Токма расположено в регионе с наименьшим потенциалом ветра по сравнению с уровнем инсоляции. Анализ долгосрочных метеорологических наблюдений показал, что использование энергии ветра приемлемо для поселений только на побережье о. Байкал. И последнее, но не менее важное, значительные неравномерные скорости ветра и шумы от ветрогенераторов в этой охраняемой окружающей среде создают серьезные проблемы, следовательно, с экологической и технической точек зрения, идея интеграции распределенной ФЭС в действующую ДЭС может оказаться лучше для системы электроснабжения и потребителей данного населенного пункта.

В дополнение к информации, приведенной выше, в южной части Иркутской области уже действует гибридная электростанция. Эта электростанция расположена в селе Нерха Тофалария в Нижнеудинском районе и состоит из дизель-солнечной электростанции. Основным фактором при выборе места для его размещения было то, что деревня Нерха Тофалария является самым сложным с точки зрения транспортировки объектом в Иркутской области. Сейчас электроснабжение жителей обеспечивается в течение нескольких часов в

течение дня: утром и вечером. Электричество подается от ДЭС [42]. Ориентировочная стоимость проекта составляет 77,6 млн. рублей, из которых 70 млн. рублей выделено из областного бюджета, 7,6 млн. рублей из собственных средств муниципалитета. Ожидаемый объем экономии топлива составляет 51,6 тонн в год [43]. Согласно расчетам сотрудников проектной организации, такая ФЭС компенсирует 50% стоимости электроснабжения всех поселений в этом районе. В то же время электроснабжение будет обеспечено весь день без перерывов. Конструкторы убеждены, что они смогут обеспечить высокое качество электроснабжения за счет увеличения напряжения. Кроме того, новая станция будет иметь возможность увеличить пропускную способность. Гибридная станция также имеет 5% резерв в случае увеличения числа потребителей.

Таким образом, одно из возможных решений в повышении эффективности использования и сокращении потребления энергии от ДЭС в децентрализованных регионах – это распределенная система ФЭС. Для первого этапа интеграции РГ от ФЭС в систему электроснабжения, данная реализация может быть выполнена путем математического моделирования и последующего технико-экономического анализа. Данные разрабатываемые системы являются технически гибкими, которые способны подключать дополнительные и независимые источники электроэнергии, что является привлекательным для научно-исследовательской задачи.

2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ MATLAB

В этой главе приводится общее описание моделирования распределенной солнечной генерации с использованием Simulink в MatLab, поведение фотоэлементов при различных параметрах, таких как уровни солнечной радиации за сезон и температура окружающей среды. Более того, в этой главе основное внимание уделяется математическому описанию солнечной радиации, неравномерным изменениям в потреблении сельского поселения за сезон и моделирование дизель-генератора.

2.1 Блок дизельной электростанции

Основную часть децентрализованной энергетики России составляют ДЭС, которые отвечают большому количеству жестких требований, предъявляемых к АСЭС. Широкий выбор ДЭС представлен на энергетическом рынке как отечественными, так и зарубежными производителями. Доля ДЭС составляет более 95% из сорока девяти тысяч малых электростанций России. Широкомасштабное применение дизельных электростанций объясняется большим количеством их неоспоримых преимуществ перед иными способами электроснабжения потребителя [65]:

1. Относительно высокий коэффициент полезного действия (КПД), до 35–40%.
2. Быстрота запуска дизель-агрегата от единиц до десятков секунд (в зависимости от номинальной мощности) и, соответственно, высокая маневренность.
3. Наличие автоматизированного технологического процесса, что определяет возможность длительного оперирования без технического обслуживания.
4. Небольшой удельный расход воды или воздуха для охлаждения двигателей.

5. Минимальность и простота вспомогательных систем технологического процесса, позволяющие обходиться малым количеством обслуживающего персонала.

6. Малая потребность в строительных объемах (до 1,5–2 м³/кВт), скоротечность строительства сооружений станции и монтажа основного генерирующего оборудования.

7. Возможность блочно-модульного исполнения ДЭС, что сводит к минимуму строительные работы в месте установки.

Основу ДЭС составляет дизельный двигатель, имеющий ряд преимуществ по сравнению с другими типами двигателей внутреннего сгорания: меньшая стоимость и расход топлива, большой моторесурс, высокая надежность, менее жесткие требования к качеству топлива, относительно высокая пожаробезопасность [18, 20, 66, 67]. Для обеспечения стабильных выходных электрических характеристик вырабатываемой электроэнергии, ДЭС содержат в своем составе автоматическую систему управления. Типовая структурная схема общепромышленной ДЭС представлена на Рисунке 19.

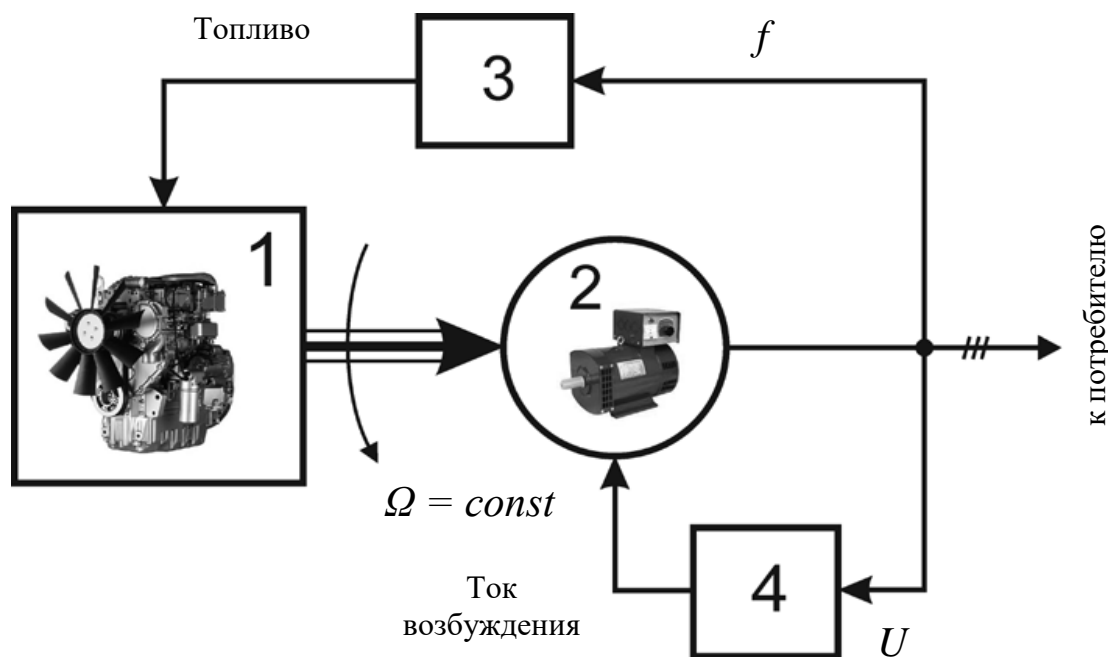


Рисунок 19 – Типовая структурная схема ДЭС [65]

1 – дизельный двигатель, 2 – синхронный генератор; 3 – регулятор частоты вращения дизеля; 4 – регулятор выходного напряжения. В типовой классической схеме ДЭС представлены две системы автоматического управления: система автоматического управления частотой вращения дизеля (частотой выходного напряжения) и система автоматического управления напряжением на выходе генератора. Назначение первой автоматической системы – стабилизация частоты вращения дизеля, назначение второй – стабилизация напряжения генератора. В силу описанного принципа работы ДЭС, для математического описания было принято решение эквивалентировать ДЭС с регулированием возбуждения синхронного генератора управляемым источником напряжения электродвижущей силы (ЭДС).

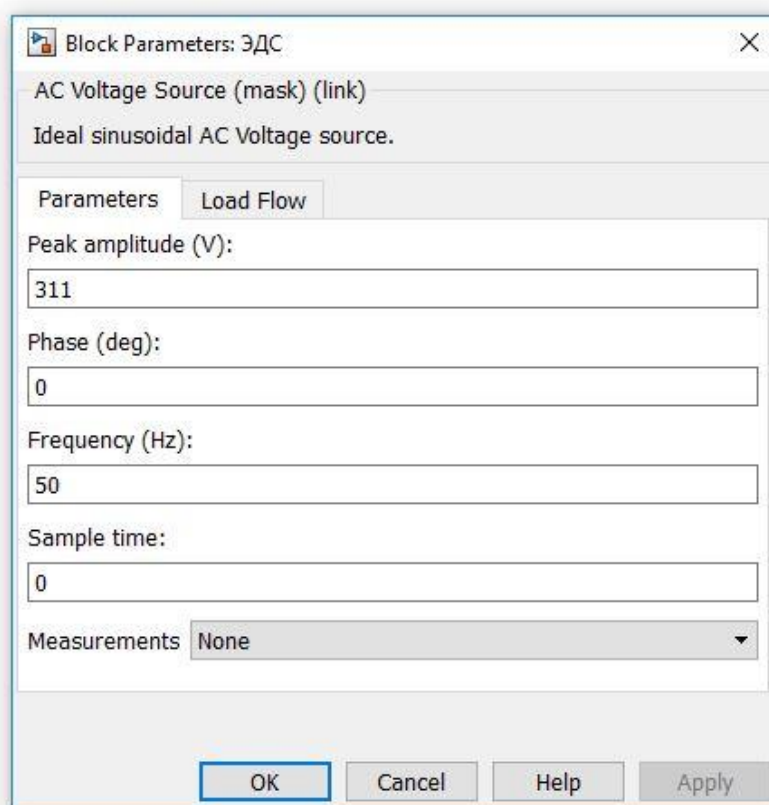
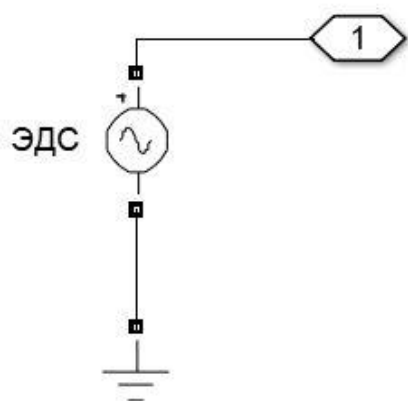


Рисунок 20 – Эквивалентруемый источник управляемого напряжения ЭДС

Рисунок 20 демонстрирует параметры блока ДЭС через управляемый источник напряжения ЭДС, где для поставленных условий математического моделирования была выбрана сеть напряжением 0,4 кВ децентрализованного

района России. Амплитудное напряжение будет иметь значение 311 В при промышленной частоте 50 Гц в однофазном исполнении.

2.2 Блок солнечной электростанции

Принципиально СЭС могут быть двух типов: термодинамические и фотоэлектрические. Фотоэлектрические станции используют эффект прямого преобразования солнечного излучения в электроэнергию, открытый в 1839 году французским физиком Беккерелем. Устройства, преобразующие солнечную радиацию в электрический ток, называются фотоэлементами или солнечными элементами. Они сами являются источниками ЭДС. Солнечные элементы генерируют электрический ток в прямой зависимости от суточных, сезонных и случайных изменений облученности. Эффективность преобразования солнечной энергии зависит не только от КПД фотоэлемента, но и от согласованности динамической нагрузки во внешней цепи. [3].

Фотоэлементы в большинстве случаев представляют собой кремниевые полупроводниковые фотодиоды. При поглощении света полупроводниковой структурой энергия фотонов передается электронам материала, что вызывает появление свободных носителей заряда. Носители заряда создают потенциальный градиент в области р-п перехода, под воздействием которого возникает электрический ток через электроприёмники. Типичная величина разности потенциалов – 0,5 В, плотность фототока – 200 А/м² при удельной мощности солнечного излучения 1 кВт/м² [72].

Основная область применения солнечных батарей связывается с осветительными системами, системами водоснабжения, удаленными станциями радиосвязи, маяками, дорожными знаками и космическими аппаратами. Батарея солнечных элементов обычно представляет собой комбинацию соединенных параллельно модулей. Солнечная ячейка, описанная выше, - основной стандартный блок фотоэлектрической системы. Как правило, размер такой ячейки – несколько квадратных миллиметров, а снимаемая мощность – около 1

Вт. Для получения большей мощности несколько таких ячеек связывают в последовательно-параллельные схемы и размещают на панели (модуле) размером несколько квадратных дециметров. Солнечные панели или батареи представляют собой группы из нескольких модулей, электрически связанных в последовательно-параллельные комбинации для получения требуемых мощности и напряжения [3].



Рисунок 21 – Внешний вид монокристаллической солнечной ячейки [3]

В настоящее время развитие технологий и науки происходит очень быстро. На рынке существует три основных типа солнечных панелей: монокристаллическая, поликристаллическая и тонкопленочная технология. Глубокий техноэкономический анализ всех типов приведен в таблице В1. Для процесса моделирования мы выбираем монокристаллические солнечные панели, потому что эти панели используются в текущих проектах [42, 43]. Кроме того, монокристаллическая конструкция имеет следующие преимущества [68, 69, 70]:

1. Монокристаллические панели имеют самые высокие показатели эффективности. КПД монокристаллических солнечных панелей обычно составляют 15-20%. Сегодня SunPower производит солнечные панели с наивысшей эффективностью на рынке США. Серия-X обеспечивает эффективность преобразования панелей до 22,2% [69].

2. Монокристаллические кремниевые солнечные панели являются экономически эффективными. Поскольку эти солнечные панели обеспечивают наивысшие выходные мощности, они также требуют наименьшего количества пространства по сравнению с любыми другими типами. Монокристаллические солнечные батареи производят в четыре раза больше электроэнергии в сравнении с тонкопленочными панелями.

3. Монокристаллические солнечные панели служат дольше всех. Большинство производителей солнечных батарей предоставляют 25 лет гарантии на свои монокристаллические солнечные батареи.

4. Они имеют тенденцию работать эффективнее, чем аналогичные номинальные поликристаллические солнечные панели в условиях низкой освещенности.

Для анализа гибридной работы СЭС с ДЭС на нагрузку создана математическая модель в приложении Simulink программы MatLab, показанная на Рисунке 22. Для моделирования переходных процессов использовалась библиотека SimPowerSystems. Модель СЭС создана на основе аппроксимированных характеристик фотоэлектрического генератора и упрощенных математических функций, что представлено в виде блока-субсистемы «Function of solar panel power».

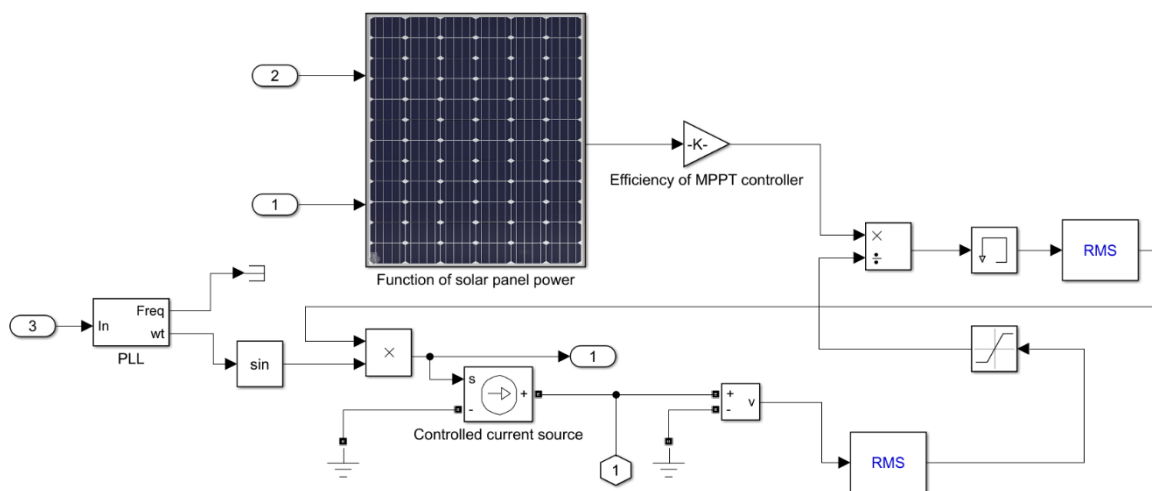


Рисунок 22 – Алгоритм работы солнечной станции в программе MatLab

ФЭС эквивалентуется источником тока в блоке «Controlled current source», который может подключаться к различным точкам сети. Фотопанели, входящие в состав СЭС, передают генерируемую мощность тока через сетевой инвертор. Современные инверторы с функциями отслеживания максимальной точки Maximum Power Point Tracking (ТММ) по своим выходным характеристикам могут также замещаться источником тока блока «Controlled current source» [20]. Влияние солнечного контроллера учтено в блоке «Efficiency of MPPT controller». Совместная параллельная работа двух источников тока ДЭС и СЭС обеспечивается за счет блока фазовой автоподстройки частоты или ФАПЧ (Phase Lock Loop) «PLL». Это система автоматического регулирования, подстраивающая фазу управляемого источника тока (СЭС) так, чтобы она была равна фазе опорного сигнала (ДЭС). Регулировка осуществляется благодаря наличию отрицательной обратной связи [20].

Главными факторами, влияющими на электрическое исполнение солнечных панелей, являются:

1. Интенсивность солнечного излучения.
2. Угол падения солнечных лучей.
3. Величина нагрузки.
4. Рабочая температура.

Для выдвинутых условий моделирования в данной работе, было принято решение упрощения и аппроксимирования функции работы солнечной панели. Выдвинутые факторы, описанные выше, будут иметь следующий вид:

Интенсивность солнечного излучения. Величина светового потока максимальна в ясный солнечный день. При наличии небольшой облачности световой поток уменьшается прямо пропорционально уменьшению интенсивности солнечного излучения. Вольт-амперная характеристика сдвигается вниз при снижении интенсивности солнечного излучения (см. Рисунок 23) [3].

Влияние температуры на выходные параметры солнечного модуля. С ростом температуры ток короткого замыкания увеличивается, а напряжение холостого хода уменьшается. Доказано, что увеличение рабочей температуры ячейки на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к снижению выдаваемой мощности на $0,45\%$. Так как увеличение тока много меньше уменьшения напряжения, при больших температурах ячейка генерирует меньшую мощность. Энергетическая характеристика ячейки для двух различных температур показана на Рисунке 23. Как видно, доступная мощность на выходе при более низкой температуре больше. Таким образом, более низкая температура выгоднее для работы фотоэлектрической ячейки [3].

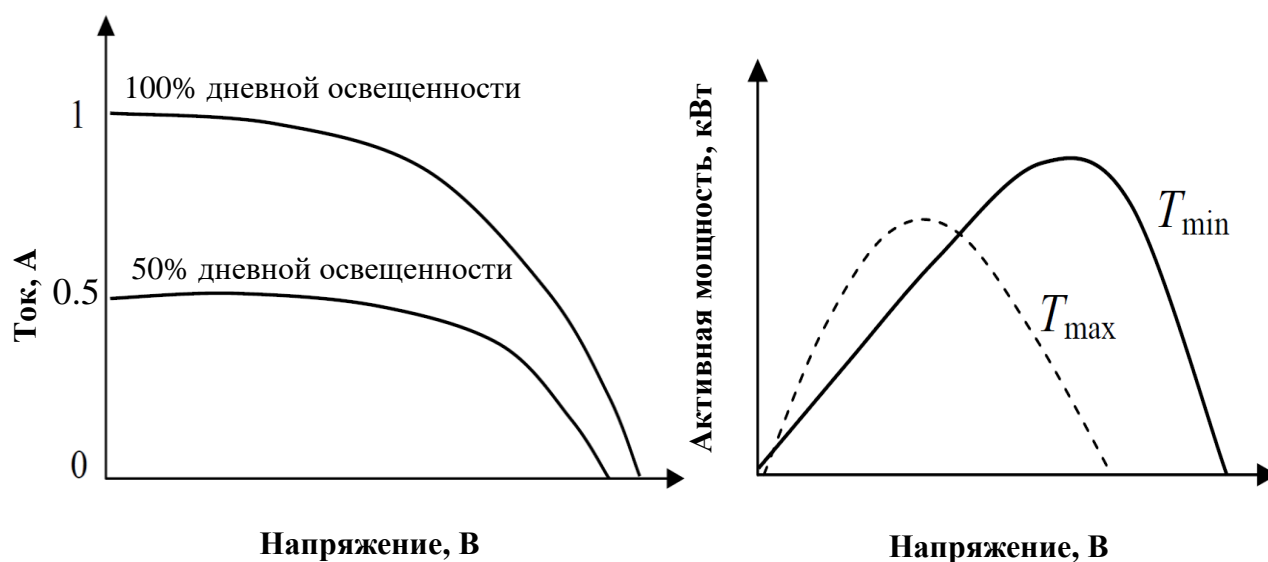


Рисунок 23 – Вольт-амперная характеристика (слева) и влияние температуры (справа) на выходные параметры солнечного элемента [72]

Таким образом, блок-субсистема «Function of solar panel power» описывает аналитическое выражение влияния температуры окружающей среды и величины интенсивности солнечного излучения, при расположении фотопанели перпендикулярно падающим лучам [8, 9, 10].

Уравнение функции генерации мощности от солнечной панели по двум входным параметрам температуры окружающей среды и интенсивности солнечного излучения представлена ниже [67]:

$$P_{sp} = \frac{C_f \cdot N_{sp} \cdot G \cdot \ln(10^6 \cdot G)}{T_{sp}}, \quad (2)$$

где N_{sp} – количество солнечных панелей; C_f – постоянный коэффициент параметров в панели солнечных батарей; G – текущий уровень солнечной инсоляции, Вт/м²; T_{sp} – текущая температура солнечной панели.

2.3 Блок солнечной радиации и температуры окружающей среды

Солнечная радиация является неисчерпаемым, мощным и экологически чистым источником энергии. Во многих странах мира использование солнечной радиации для хозяйственных нужд приобретает все больший размах, интерес к этой проблеме постоянно растет как со стороны потенциальных потребителей солнечной энергии, так и со стороны научно-исследовательских организаций.

Несмотря на всю привлекательность солнечной радиации как источника энергии, ее использование для общественных нужд на большей части территории России ограничено климатическими особенностями и отсутствием надежных методов по ее определению. При этом основными сдерживающими факторами являются сравнительно небольшое количество жарких и солнечных дней в году, а также нестабильность поступления теплоты в течение дня. Тем не менее в децентрализованных регионах России энергия солнечной радиации может находить свое практическое применение [73].

Величина первичной солнечной энергии, которая доступна для преобразования ФЭС, определяется интенсивностью суммарного солнечного излучения в месте ее установки, и зависит от географических координат месторасположения ФЭС, пространственной ориентации солнечной панели, а также от внешних метеорологических факторов: температуры воздуха, уровня облачности, коэффициента отражения земной поверхности.

Большинство метеорологических факторов имеют стохастическую природу. В настоящее время при проектировании ФЭС преимущественное

распространение получили вероятностные (статистические) методы расчета радиационных характеристик [16–18, 75], которые используют в качестве исходных данных специальные климатические справочники или электронные базы, составленные по результатам многолетних метеорологических наблюдений [73].

В основу расчета данной работы положена методика, позволяющая определить почасовое поступление солнечной радиации на наклонную плоскость предложенной Лю и Джорданом. При вычислении солнечной радиации, поступающей на какую-либо наклонную плоскость, принимают во внимание три составляющие радиационного баланса [74, 76]:

$$Q_{\text{накл}} = S_{\text{накл}} + D_{\text{накл}} + R_{\text{накл}}, \quad (3)$$

где $Q_{\text{накл}}$ – суммарная солнечная радиация, падающая на наклонную поверхность, Вт/м²; $S_{\text{накл}}$ – прямое солнечное излучение, падающее на наклонную поверхность, Вт/м²; $D_{\text{накл}}$ – рассеянная солнечная энергия, падающая на наклонную поверхность, Вт/м²; $R_{\text{накл}}$ – излучение, отраженное от поверхности Земли, Вт/м² (значением можно пренебречь).

Значение $S_{\text{накл}}$ находят по зависимости:

$$S_{\text{накл}} = S_{\text{орт}} \cdot \cos \theta, \quad (4)$$

где $S_{\text{орт}}$ – прямое солнечное излучение на ортогональную лучам плоскость, Вт/м².

$$S_{\text{орт}} = \frac{S_0 \cdot \sin \alpha}{\sin \alpha \cdot c}, \quad (5)$$

где S_0 – солнечная постоянная, 1395 Вт/м²; c – величина, характеризующая степень прозрачности атмосферы.

Косинус угла падения прямого солнечного излучения на любую плоскость в зависимости (4) определяют следующим образом:

солнечного луча. Часовой угол (ω) – угол, который определяет угловое смещение Солнца в течение суток. Один час соответствует $\pi/12$ рад или 15° углового смещения. В полдень часовой угол равен нулю [73].

Значение склонения δ можно оценить по приближенной формуле Купера:

$$\delta = 0,41 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284 + N}{365}\right), \quad (7)$$

где N – порядковый номер дня в году, отсчитываемый от 1 января.

Синус угла α находят по формуле:

$$\sin \alpha = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega. \quad (8)$$

Рассеянную солнечную радиацию, поступающую на наклонную плоскость, определяют по формуле:

$$D_{\text{накл}} = D_{\text{гориз}} \cdot [0,55 + 0,434 \cdot \cos \theta + 0,313 \cdot (\cos \theta)^2], \quad (9)$$

где $D_{\text{гориз}}$ – поток рассеянной солнечной энергии (Вт/м^2) на горизонтальную плоскость, определяется по зависимости:

$$D_{\text{гориз}} = \frac{1}{3} \cdot (S_0 - S_{\text{орт}}) \cdot \sin \alpha. \quad (10)$$

Рассеянная солнечная радиация, отраженная от Земли:

$$D_{\text{земли}} = 0,47 \cdot A_{\text{земли}} (S_{\text{накл}} - D_{\text{гориз}}), \quad (11)$$

где $A_{\text{земли}}$ – альбедо Земли.

Альбедо Земли – интегральное отношение в долях единицу отраженного от Земли по всем направлениям потока солнечной энергии к потоку, упавшему на отражающую поверхность Земли [73].

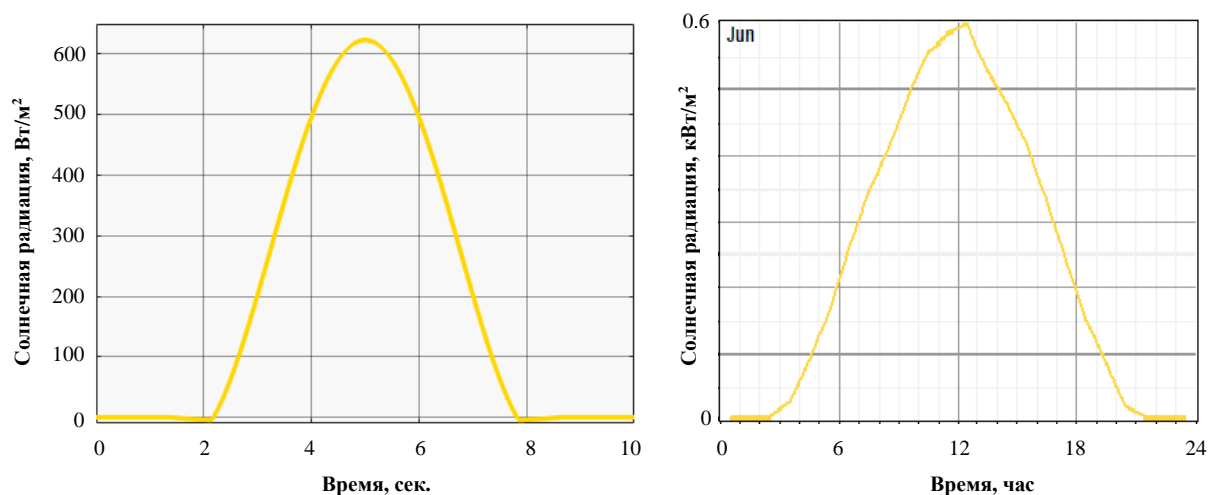
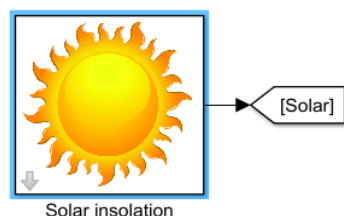


Рисунок 25 – Графики солнечной радиации в июне Nomer Energy (справа) и построенный блок (слева)

Модель выполнена в виде подсистемы, состоящей из восьми основных функциональных блоков, обеспечивающих решение системы уравнений (3)–(11). Созданный блок (см. Рисунок 26) позволяет определить текущие значения величины приходящей солнечной радиации в любой день года в случайном географическом расположении панели для произвольно ориентированной поверхности. Для оценки приемлемости созданного блока на релевантность модулируемых данных, результаты моделирования должны сравниваться с программным обеспечением, которое уже давно используется в научно-исследовательских и общественных целях. В этом случае это будет Nomer Energy.

Необходимо отметить, что Nomer Energy использует данные наблюдений Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA), период наблюдений которых был производился с 1983 по 2004 года. Как мы можем заметить, для выбранной ежедневной величины солнечной радиации в июне, созданный блок имеет приблизительно те же результаты, что и Nomer Energy.



Block Parameters: Solar insolation

Latitude of area, degrees
58

Azimuth angle of panel, degrees
0

Panel tilt angle, degrees
75

Number of simulated day
51

The atmosphere transparency index
0.416

Albedo of the Earth's surface (0.2 - grass, 0.9 - snow)
0.9

Coefficient of location (land)
0.26

Cloudiness, where n = 0 - cloudlessness, n = 1 - cloudy
1

OK Cancel Help Apply

Рисунок 26 – Субсистема блока солнечной радиации в MatLab

Модель позволяет определять текущие значения величины приходящей солнечной радиации для любого дня года в произвольном географическом месте размещения ФЭП на произвольно ориентированные поверхности.

Доминирующее влияние на энергетические характеристики фотоэлектрических преобразователей также оказывает величина температура окружающей среды. Для ФЭС, расположенных в высоких северных широтах, к которым относятся большинство территорий России, внешние метеорологические факторы могут оказывать существенное влияние на производительность солнечной батареи и их желательно учитывать. Наиболее просто определяются среднемесячные и среднесуточные значения температуры окружающего воздуха, которые являются независимыми величинами от параметров проектируемой электроустановки. Исходными данными для их определения являются статистические данные метеорологических наблюдений, которые можно получить из архивов метеорологических сайтов и климатических справочников [77].

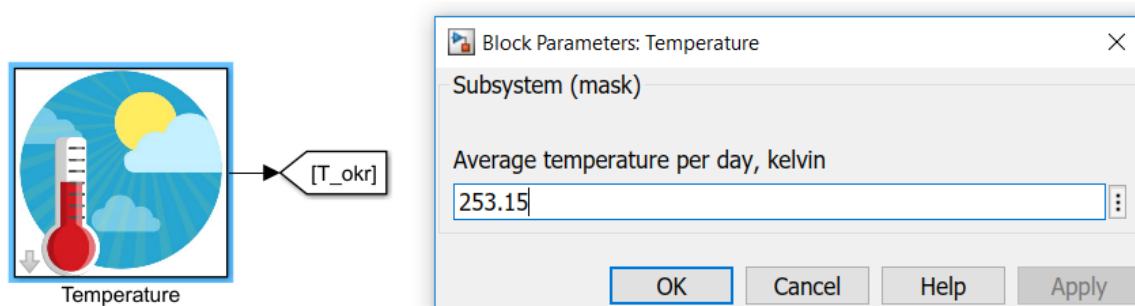


Рисунок 27 – Субсистема блока температуры окружающей среды в MatLab

Результаты моделирования показали, что разработанные блоки работают с удовлетворительной точностью.

2.4 Блок потребителей и линий электропередачи

От электрических сетей в сельских районах обычно питается большое число разнообразных потребителей электрической энергии, под которыми понимают приемник или группу приемников электрической энергии, объединенных технологическим процессом и размещенных на определенной территории. Электроприемником, в свою очередь, называют аппарат, агрегат или механизм, предназначенный для преобразования электрической энергии в энергию другого вида.

В удаленных децентрализованных сельских районах находят следующие потребители электрической энергии:

1. Жилые дома рабочих и служащих в населенных пунктах, фермерские хозяйства.
2. Объекты социального значения: больницы, школы, клубы, магазины, детские сады и т.д.
3. Мелкие предприятия производств по переработке природных ресурсов и сельскохозяйственной продукции.

Электрическая нагрузка в децентрализованных объектах – величина непрерывно изменяющаяся: одни потребители включаются, другие отключаются

в течение всего дня. Мощность, потребляемая включенными электроприемниками, также уменьшается или увеличивается с изменением загрузки приводимых в действие рабочих машин. Кроме того, с течением времени общая электрическая нагрузка непрерывно увеличивается, так как тенденция электрификации сельскохозяйственного производства и быта сельского населения постоянно растет [66].

Для моделирования различных типов электрических нагрузок децентрализованных объектов сельской местности, показатели величин определяют по нормативным типовым графикам реальных электрических нагрузок, данные которых были получены в ходе статистических наблюдений периода от 5 до 10 лет. Для целей данной исследовательской работы удобны суточные графики нагрузки по продолжительности. Базовой моделью электрической нагрузки служил типовой график активной и реактивной нагрузки сельских жилых домов и др., типичный для автономных потребителей.

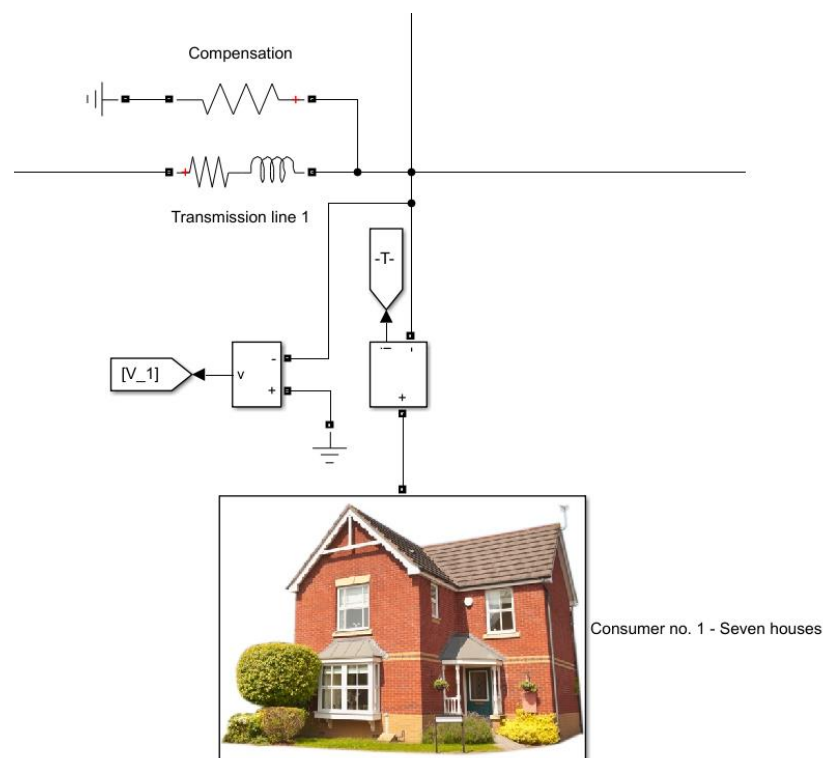


Рисунок 28 – Субсистема блока потребителя и линии электропередачи в MatLab

Модель потребителя построена на базе управляемых ключей в соответствии с разделением временных интервалов в течение дня: утро, день,

вечер, ночь с коммутируемой величиной активно-индуктивных сопротивлений участков цепи.

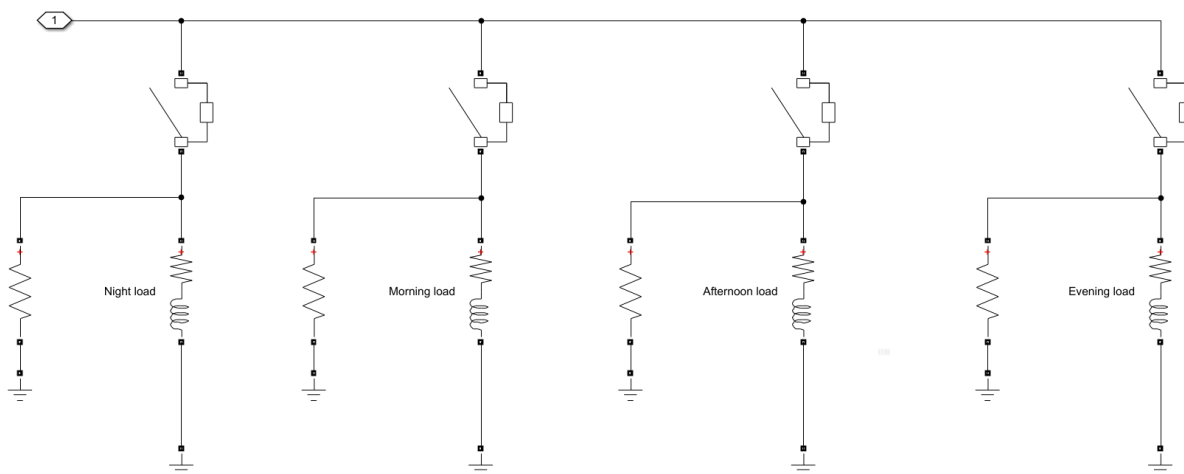


Рисунок 29 – Блок коммутации суточных фаз нагрузок в MatLab

Ниже представлены результаты расчетов, агрегированные в виде суточных графиков электрических нагрузок, села Токма. Это сельское поселение состоит из двух групп жилых домов с различным уровнем потребления электроэнергии (первый блок из семи домов, второй блок из восьми домов), здания начальной школы, магазина и административного здания. Градация цвета диаграмм нагрузки делит часы суточных фаз в течение моделируемого дня потребления электрической энергии.

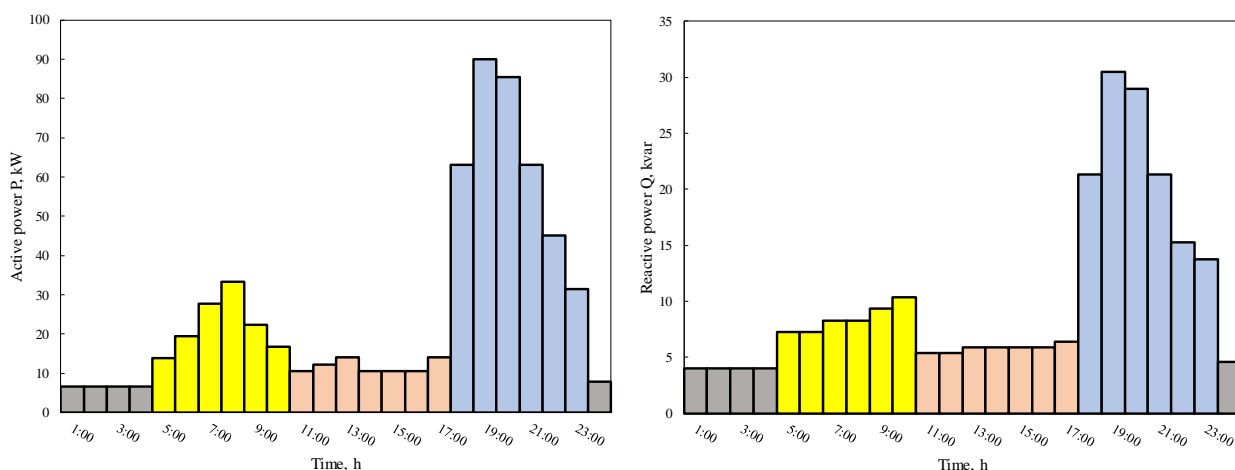


Рисунок 30 – Зависимости потребления активной и реактивной мощности села Токма за зиму

Как показано на Рисунке 30, в 19:00 мы можем наблюдать максимум потребления активной и реактивной мощности в зимнее время. Согласно

номенклатуре ДЭС в селе Токма, которая была описана в первой главе, существуют две ДЭС с номинальной мощностью 30 и 60 кВт соответственно. Серый цвет отображает ночное потребление, желтый цвет – утреннее потребление, персиковый цвет – день, а синий – вечернее.

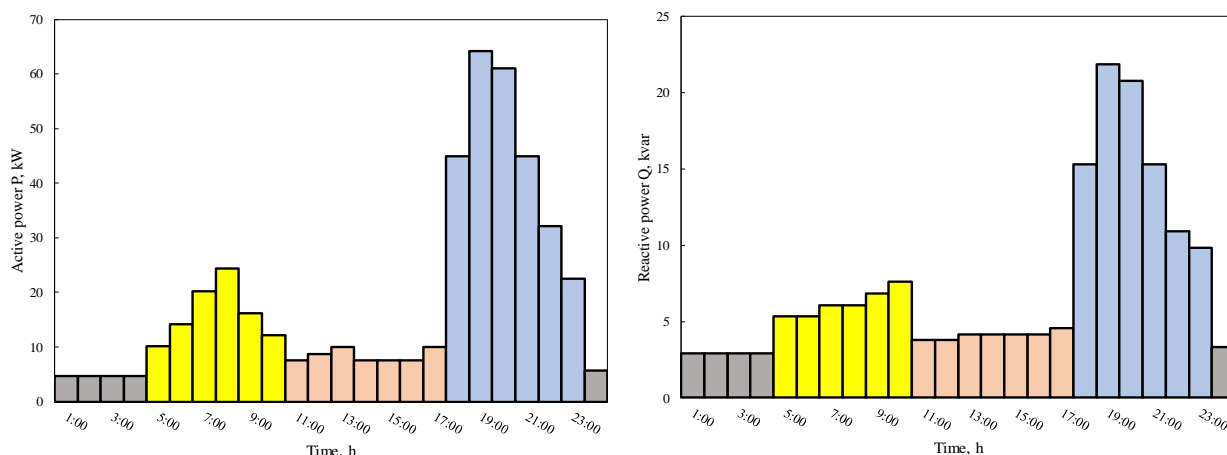


Рисунок 31 – Зависимости потребления активной и реактивной мощности села Токма за лето

Данная работа фокусирует исследование системы электроснабжения для условий летнего сезона, которая целесообразна, поскольку зимняя инсоляция в центральной России ($55\text{--}58^\circ$ северной широты) в 15 раз меньше, чем на летом [20]. Величина летней инсоляции определяет создание СЭС, которая будет эффективна исключительно в летнее время. Зимой, с увеличением потребления энергии и снижением инсоляции, роль СЭС значительно снижается и практически не влияет на электрический режим системы. Полученные условия способствуют созданию математической модели АСЭС с распределенной генерацией ФЭС.

Потребители подключаются через секции питающих линий с активно-индуктивными параметрами. Длина линий передачи ограничена максимально допустимым отклонением напряжения при нагрузке в конце линии относительно номинального значения. В Государственном стандарте предельное значение для любого отклонения не более 10% [20]. Таким образом, длина линии будет зависеть от известных факторов, таких как удельное сопротивление линии и

величина передаваемой нагрузки. Расчет сопротивления пяти секций магистральной ЛЭП с напряжением 0,4 кВ представлен в следующей таблице:

Таблица 3 – Преобразование сопротивлений линий электропередач

Номер секции	Параметры		
	Длина, м	R, Ом	L, Гн
1	200	0,17	$2,7 \cdot 10^{-4}$
2	10	0,0085	$1,3 \cdot 10^{-5}$
3	10	0,0085	$1,3 \cdot 10^{-5}$
4	25	0,0213	$3,3 \cdot 10^{-5}$
5	50	0,0425	$6,6 \cdot 10^{-5}$

3 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

В этой главе рассматривается структура гибридной автономной энергосистемы. Представлено общее описание оборудования, которое использовалось для моделирования переходных процессов. Результаты моделирования включают случаи одиночной ФЭС и варианта с распределенным монтажным исполнением. Также предлагаются рекомендации по таким вопросам качества, как повышение уровня напряжения в конце линии электропередачи, снижение потерь электрической энергии. Эти результаты будут сравниваться с случаем АСЭС без ВИЭ.

3.1 Вопросы повышения качества электрической энергии

3.1.2 Блок-схема АСЭС с распределенной системой ФЭС

Мнемосхема электроснабжения АСЭС с распределенной системой ФЭС представлена на Рисунке 32. ДЭС и ФЭС соединены параллельно с подачей на нагрузку. Необходимо провести ряд математических расчетов для корректировки модели и получения наиболее точных результатов с точки зрения индикаторов электроэнергии. Процесс моделирования будет разделен на две группы вычислений:

1. Единая ФЭС без распределения по сети.
2. Распределенное монтажное исполнение ФЭС вдоль сети.

Доля прерывистой электроэнергии в общем энергетическом балансе гибридной системы электроснабжения обычно составляет не менее 50%. Нагрузка на ДЭС увеличивается с уменьшением установленной мощности установок с возобновляемой энергетикой. Увеличение продолжительности режимов генерации возобновляемого энергоресурса, недостаточное для текущего охвата нагрузки, определяет целесообразность режимов параллельной работы гибридной силовой установки [1]. Важно заметить, что сетевой инвертор может работать параллельно только с достаточно мощной сетью

электроснабжения. В АСЭС такая энергосистема создается ДЭС. Ведущие производители солнечных инверторов не рекомендуют уменьшать текущую загрузку ДЭС в гибридных системах менее чем до 40–50% относительно мощности полной генерации. Это ограничение основано на условиях стабильности системы электропитания [1].

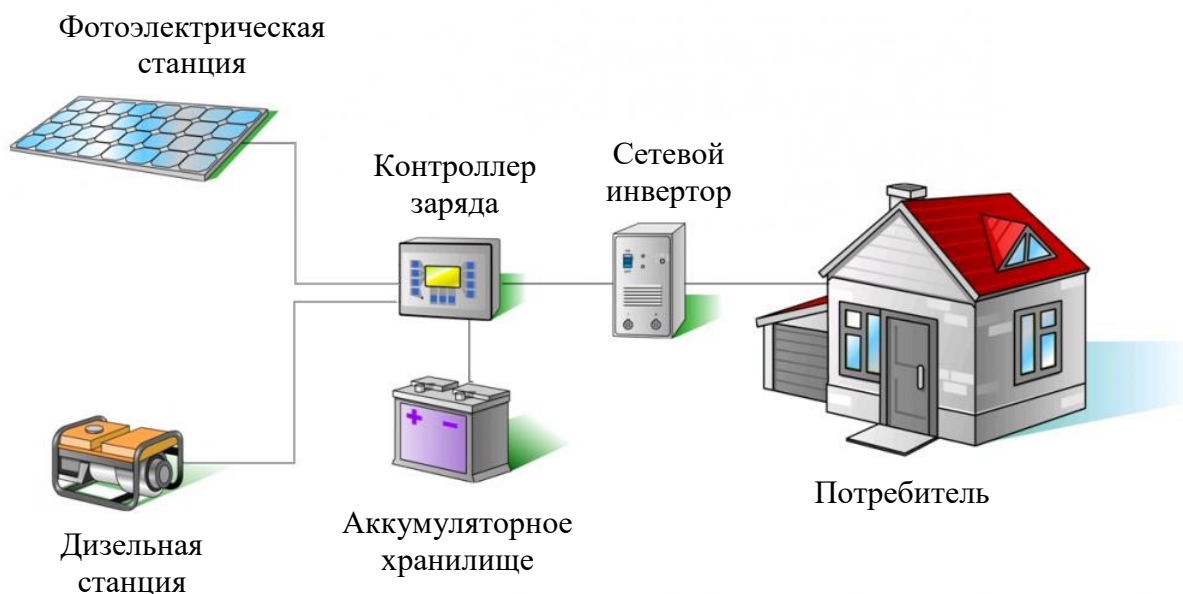


Рисунок 32 – Блок-схема автономно-гибридной системы электропитания с фотоэлектрическим источником [78]

Гибридная система электроснабжения на Рисунке 32 имеет следующие преимущества: как сетевые, так и автономные инверторы могут применяться даже с минимальным набором опций и представлены на рынке ВИЭ в различных вариантах от многочисленных производителей; батареи всегда полностью заряжены и используются в буферном режиме только в случае сбоев сети. Такая система рекомендуется использовать в системах электроснабжения, где электричество потребляется в основном во время дневного света, а отключения электросети являются редкими и короткими. Эта система имеет только один недостаток: производство солнечной энергии прекращается, когда происходят сбои сети [1].

В дневное время сетевой инвертор обеспечивает питание для всех потребителей. Избыточная энергия отправляется в общую сеть только в тех

случаях, когда потребление меньше, чем генерация ФЭС, в то время как энергия солнца также используется для заряда батарей. Эффективность сетевых инверторов составляет более 90%, что обеспечивает хорошие энергетические характеристики всей системы электропитания.

3.1.2 Регулировка солнечной электростанции

Годовое потребление электроэнергии, по расчетным данным, в децентрализованном селе составляет 195,1 МВт·ч/год, где предполагается, что число членов семьи, проживающих в жилых зданиях, составляет от двух до пяти человек. Поэтому предлагаемая модель системы питания должна обеспечивать эту нагрузку выбранным соотношением мощности между источниками.

Для этого случая моделирования необходимо знать ряд солнечных панелей, которые будут использоваться для улучшения качества уровня напряжения, снижения расхода топлива и уменьшения потерь мощности в линиях передачи. В соответствии с описанным принципом режима работы сетевого инвертора, ограниченная установленная мощность ФЭС должна составлять не менее 50% от основного источника электроэнергии в АСЭС. Это ограничение в установленной мощности должно быть взято от основного источника энергии в деревне Токма. Таким образом, установленная мощность ФЭС составляет 40% от 76 кВт ДЭС, где конечное значение составляет 30,4 кВт.

Основываясь на установленной мощности ФЭС, мы можем вычислить ряд необходимых солнечных панелей. Для моделирования были выбраны монокристаллические солнечные панели TSM-200 [79], которые имеют следующие параметры:

Таблица 4 – Параметры солнечной панели TSM–200

Параметр	Значение
Номинальная мощность ($P_{\text{ном}}$)	200 Вт
Номинальное напряжение ($U_{\text{ном}}$)	24 В
Напряжение холостого хода ($U_{\text{хх}}$)	43,2 В
Ток короткого замыкания ($I_{\text{кз}}$)	6,22 А
Ток точки максимальной мощности ($I_{\text{макс}}$)	5,56 А
Номинальная температура работы ячейки	-40...+85 °С
Размеры	1580 x 808 x 40 мм ²
Вес	17,3 кг
Тип	Монокристаллическая

Для данного случая количество солнечных панелей будет описываться уравнением:

$$N = \frac{P_{\text{сп}}}{P_{\text{ном}}} = \frac{30,4}{0,2} = 152. \quad (12)$$

Также необходимо определить оптимальное значение угла зоны приема солнечной панели. Для проведения расчетов лучше использовать известные математические программные пакеты, например, Simulink в MatLab. Есть несколько возможных случаев ориентации солнечных панелей во время их работы [1]:

1. Ориентация с помощью датчиков и систем слежения. Эти системы перпендикулярны потоку падающего излучения. В этом случае параметры отслеживания возможны как для двух осей (азимут и наклон), так и для одной оси (наклона).

2. Программные алгоритмы вращения солнечных панелей, в зависимости от местоположения солнца с помощью специальных приводов. В этом случае варианты поворота возможны как по двум осям (азимуту и наклон), так и по одной оси (наклону).

3. Дискретно-сезонное изменение угла наклона панели. В данном варианте по азимуту панели ориентированы на юг.

4. Фиксированное положение панели, как по углу наклона, так и по азимуту, на весь период работы.

Для моделирования предлагается использовать третий вариант. Третий вариант имеет более низкую энергоэффективность, чем первая или вторая, но его легко реализовать. Он обычно используется на небольших электростанциях (например, в деревнях) или когда солнечные панели интегрированы непосредственно в структуру здания. Следует отметить, что ориентация по азимуту на юг не может быть выполнена очень точно (с точностью до нескольких градусов). Как показали исследователи в [1], изменение азимута на 15° снижает приход солнечной радиации на поверхность на 5%.

Обычно солнечные панели располагаются под углом наклона, равным широте области с южной ориентацией. Если количество солнечных панелей позволяет совершать сезонные изменения наклона с приемлемой рабочей силой, эту особенность следует учитывать. Энергетический потенциал солнечной радиации распределяется более равномерно по всей России. Возможность использования ФЭС не только прямого солнечного излучения, но и диффузного позволяет использовать СЭС между $55\text{--}58^\circ$ северной широты [20].

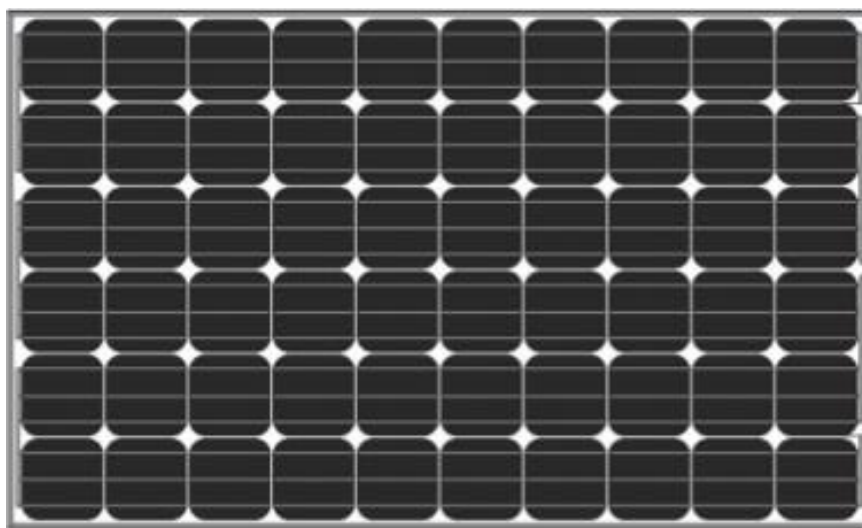


Рисунок 33 – Солнечная панель TSM–200 [79]

Таким образом, используя описанный вариант, можно настроить угол наклона приемной поверхности солнечной панели в течение типичного дня года в средних облачных условиях для анализируемого сезона. Результаты расчетов оптимального угла наклона солнечных панелей и азимутальной ориентации приведены в следующей таблице:

Таблица 5 – Результаты ориентации солнечных панелей за сезон

Сезон	Угол наклона	Азимутная ориентация
Зима	75°	юг, 0°
Весна	30°	юг, 0°
Лето	30°	юг, 0°
Осень	75°	юг, 0°

3.1.3 Инвертор

Инвертор – это устройство, которое преобразует постоянный ток в переменный ток с заданными параметрами (напряжение, частота). Кроме того, как интеллектуальная система, он контролирует работу всей энергетической системы. SMA Solar Technology AG [80] является одной из ведущих мировых компаний в области разработки, производства и продажи энергетического оборудования и устройств для строительства различных систем электроснабжения.

Технологии SMA, разработанные с использованием новейших достижений в области электроники, позволяют максимально эффективно использовать автономные, сетевые и резервные энергосистемы на основе как традиционных, так и ВИЭ. Как технологический лидер, SMA Solar Technology разрабатывает и производит высокопроизводительные инверторы мощностью от 2 до 1000 кВт для установок любого размера, всех классов мощности и спецификаций. Основной деятельностью SMA является разработка и производство инверторов. Инвертор является технически наиболее важным компонентом любой энергосистемы, в которой используются генераторные

установки постоянного тока, такие как солнечная панель, ветрогенератор, ДЭС и другие. SMA предлагает множество моделей инверторов, которые можно разделить на три важные характеристики: мощность, режим постоянного тока и топология схемы. Используемая мощность инвертора находится в диапазоне от 1600 Вт до нескольких МВт. Номинальная мощность может составлять от 3 до 6 кВт для энергетических систем частного сектора, от 10 до 20 кВт для коммерческих установок ФЭС на крышах предприятий или бытовых зданий и от 500 до 800 кВт для СЭС [1].

Важной технической характеристикой инверторов является метод переключения со стороны постоянного тока, который определяет возможные варианты подключения фотоэлектрических установок к инвертору. Эта особенность вызвана тем, что во многих СЭС солнечный модуль может содержать несколько массивов панелей, которые имеют различное освещение, различный тип и, соответственно, разные выходные характеристики. Для максимального использования солнечной энергии SMA разработала специальные многоканальные инверторы.

В зависимости от температуры и интенсивности падающего излучения всегда существует точная корреляция между силой электрического тока и напряжением, позволяющей СЭС генерировать максимальную мощность. Это также называется максимальной точкой питания. Поскольку температура и интенсивность падающего излучения постоянно меняются (например, благодаря облакам), система управления инвертором должна непрерывно контролировать максимальную точку питания, чтобы модули ФЭС производили максимально возможное количество электрической энергии. Для этой цели используется программа MPPT.

Многоканальные инверторы имеют два или более канала ввода, каждый из которых имеет свой собственный трекер. Особый интерес представляет массив солнечных панелей с различными поверхностями, которые направлены

по-разному или частично затенены. Несмотря на более высокую выходную мощность, основные инверторы имеют только один трекер для максимального поиска мощности. Они особенно подходят для крупномасштабной СЭС с однородным набором солнечных панелей.

В соответствии с конкретным алгоритмом работы, в этом случае было принято решение использовать сетевой инвертор. SMA Sunny Mini Central – это солнечный инвертор с высокоэффективными солнечными преобразователями энергии с эффективностью до 98%. Этот инвертор идеально подходит для построения солнечных энергетических систем средней мощности (от 15 кВт и более). Передовые технические решения, а также лучшее соотношение цена-производительность, позволяют встроенным преобразователям Sunny Mini Central быть идеальными устройствами для средних и больших солнечных установок, а небольшая градация мощности обеспечивает гибкость конструкции и позволяет использовать точную конфигурационную систему. SMA Sunny Mini Central инверторы также отлично подходят для создания автономных энергосистем [80].



Рисунок 34 – Инвертор SMA Sunny Mini Central 10000TL–10 [80]

Инверторы Sunny Mini Central, в сочетании с контроллером заряда, позволяют создавать автономную сеть переменного тока с батареями, отвечающую самым высоким стандартам качества. В системах, основанных на солнечных Sunny Mini Central инверторах, генераторы и потребители электроэнергии интегрированы в сеть в равной мере. Системы ФЭС, ВЭС, ДЭС и микро-ГЭС могут быть подключены на стороне переменного тока 220 В так же, как и обычные потребители [1].

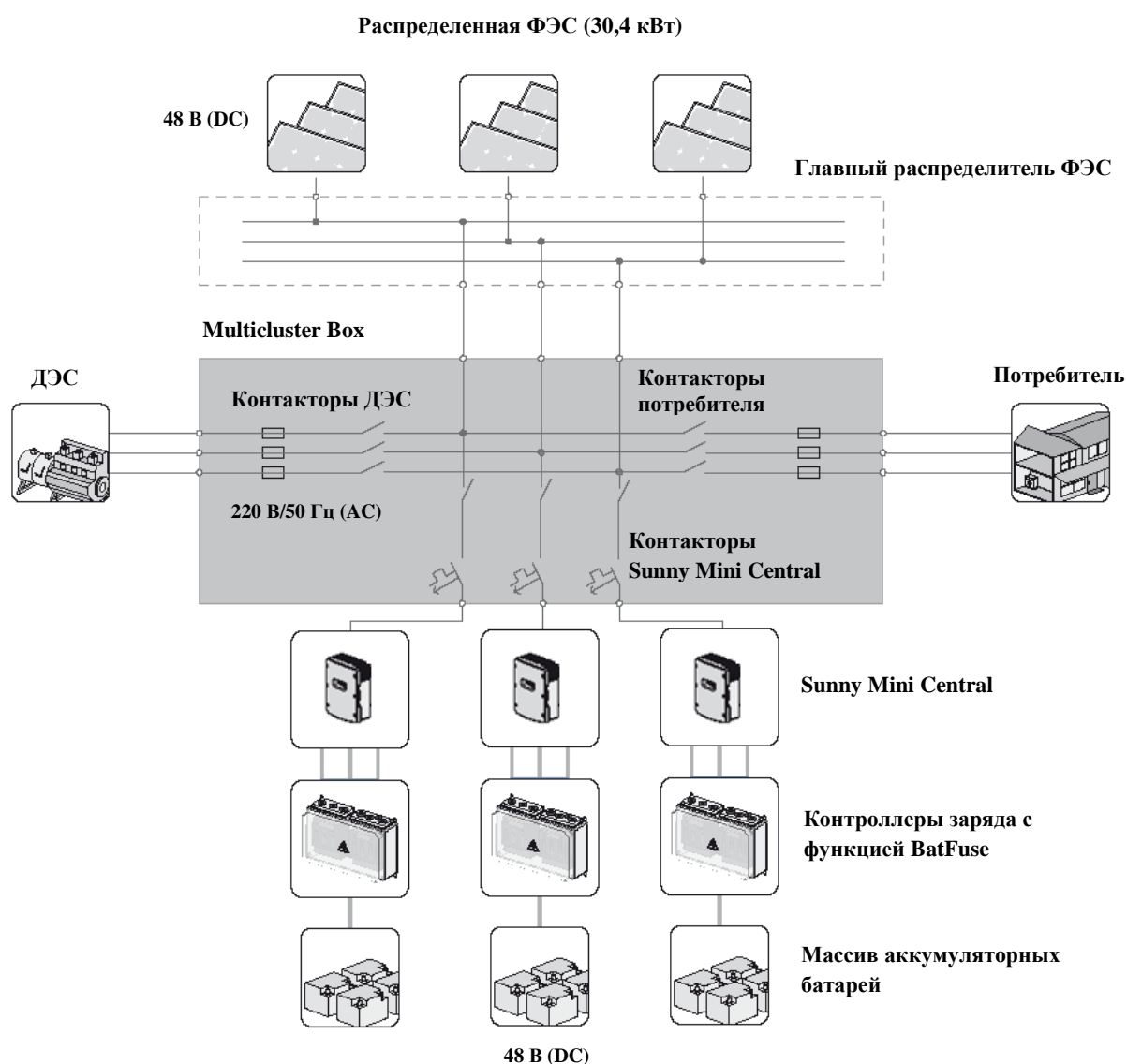


Рисунок 35 – Электрическая схема автономной системы электропитания [80]

Multicluster Box – это компонент много кластерной технологии SMA для систем с автономными электрическими сетями. Multicluster Box является основным распределителем переменного тока, к которому можно подключить до

двенадцати трехфазных кластеров. Каждый кластер состоит из двух устройств того же типа Sunny Mini Central, соединенных параллельно на стороне постоянного тока. BatFuse защищает соединительные кабели аккумулятора [80].

Sunny Mini Central поддерживает параллельную работу до четырех устройств на одной фазе или трех устройствах на трех фазах без дополнительных соединительных устройств. Инвертор позволяет создавать автономные системы питания мощностью от 15 кВт. Представленный инвертор имеет набор важных параметров, которые будут приняты для будущих расчетов. Предоставленная информация оформлена в следующей таблице:

Таблица 6 – Параметры инвертора Sunny Mini Central 10000TL-10

Параметр	Значение
Номинальная частота	50 Гц
Номинальное напряжение сети	220 (180–260) В
Номинальная мощность	10 кВт
Максимальное входное напряжение	333–500 В (DC)
КПД	98%
Номинальный диапазон рабочих температур	-25...+60 °С
Габариты	468 х 613 х 242 мм
Вес	35 кг
Трехфазное исполнение/параллельное подключение в однофазном исполнении	да/да

Выбор инверторов основан на мощности ФЭС. ФЭС имеет установленную мощность 30,4 кВт с рядом солнечных панелей в количестве 152 штуки. Это означает, что с учетом установленной мощности Sunny Mini Central 10000TL-10 10 кВт, это уравнение будет описываться рядом инверторов:

$$N = \frac{P_{\text{сэс}}}{P_{\text{инв}}^{\text{ном}}} = \frac{30,4}{10} \approx 3. \quad (13)$$

Производители регулируют напряжение подключенных солнечных панелей, поэтому максимально допустимое входное напряжение, указанное в технических данных инвертора, должно соответствовать напряжению холостого

хода цепи солнечной панели или сумме напряжений холостого хода цепи группы последовательно подключенных солнечных панелей с запасом не менее 20%. Резервный запас объясняется следующими условиями [1]:

1. Входное напряжение, указанное изготовителем, может быть завышено.
2. Когда солнечная активность высока, напряжение холостого хода цепи солнечной панели может быть выше, чем указано изготовителем.

$$U_{\max}^{СП} = 1,2 \cdot U_{XX} \cdot N_{\text{посл}} \leq U_{\max}^{\text{инв}}, \quad (14)$$

где U_{XX} – напряжение холостого хода цепи солнечной панели, $N_{\text{посл}}$ – количество солнечных панелей, которые соединены последовательно, $U_{\max}^{\text{инв}}$ – входное напряжение для солнечных панелей.

Согласно правилу параллельного и последовательного соединения элементов электрических цепей, ряд солнечных панелей должен удовлетворять уравнению (14). Как было описано выше, число инверторов составляет три. Это означает, что для каждой фазы трехфазной автономной системы электропитания будет один инвертор. Каждый инвертор будет включать требование уравнения (14). Таким образом, солнечные панели будут связаны с следующим образом:

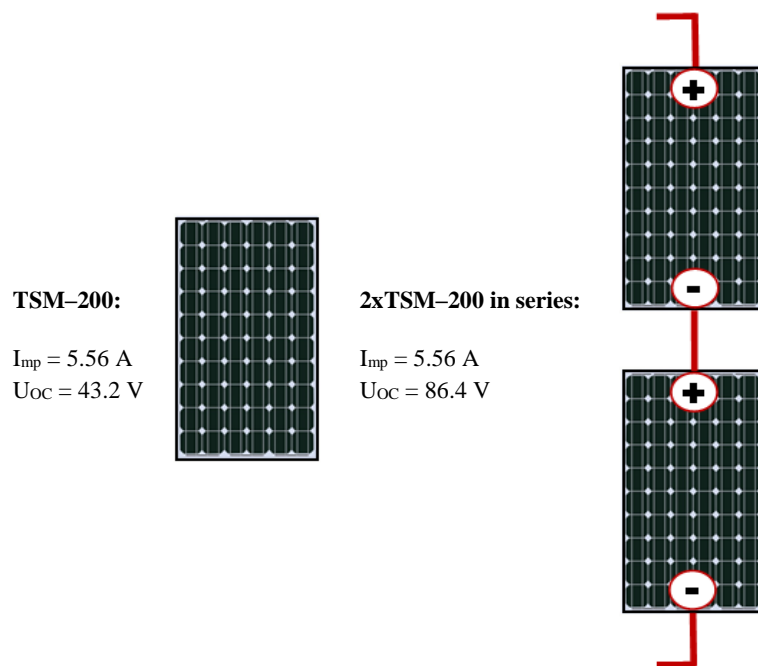


Рисунок 36 – Электрическая схема подключения солнечных панелей

На основании Рисунка 36 порядок подключения солнечных панелей будет следующий: две панели последовательно соединены в двадцать шесть блоков параллельных массивов. Этот массив будет состоять из пятидесяти двух солнечных панелей с одним инвертором. Тот же принцип будет для оставшейся части инверторов. Необходимо отметить, что количество солнечных панелей должно быть увеличено до 156 для симметричной структуры массива.

$$U_{\max}^{сп} = 1,2 \cdot 43,2 \cdot 2 = 103,2 \text{ В} \leq 230 \text{ В}. \quad (15)$$

Как мы видим, требование в уравнение (15) выполняется. Таким образом, мы используем 156 солнечных панелей с инверторами SMA Sunny Mini Central.

3.1.4 Аккумуляторные батареи

Удаленные системы электропитания с ФЭС используются там, где нет централизованной сети электроснабжения. Чтобы обеспечить электроэнергию в темное время суток или во время периодов отсутствия солнечного света, потребуется перезаряжаемая аккумуляторная батарея.

Основными условиями выбора таких устройств являются [1]:

1. Устойчивость к циклической работе.
2. Способность выдерживать глубокий разряд.
3. Низкий саморазряд.
4. Устойчивость к нарушению условий зарядки и разрядки.
5. Долговечность.
6. Простота обслуживания.

Важным параметром малых СЭС является компактность и герметичность. Эти требования полностью удовлетворяются аккумуляторными батареями, изготовленными с использованием технологий «dryfit» или рекомбинации с использованием абсорбирующего электролита (AGM). Они

характеризуются отсутствием эксплуатационных затрат и перекрывают диапазон мощностей 1–12 000 А·ч. Газы, производимые во время зарядки, не покидают аккумулятор, поэтому электролит не потребляется и, следовательно, обслуживание не требуется.

Эксплуатация аккумуляторных батарей с глубоким разрядом приводит к необходимости их частой замены. Цены и техническое обслуживание таких систем значительно возрастают. Глубина разрядки аккумуляторных батарей в солнечных системах, как правило, ограничена на уровне 30–40%, что достигается отключением нагрузки или увеличением емкости аккумулятора. Поэтому, для управления процессом зарядки, солнечная электростанция должна включать в себя контроллеры заряда и разряда.



Рисунок 37 – Аккумуляторная батарея Delta DTM 12250 L на основе технологии AGM [81]

В батареях AGM используется стекловолоконный мат, насыщенный серной кислотой. Батареи AGM иногда также называют сухими батареями, потому что стекловолоконный мат насыщен серной кислотой только на 95%, в котором нет избыточной жидкости. Аккумулятор AGM чист, например, при транспортировке, нет необходимости соблюдать требования для опасных материалов. Они отлично подходят для АСЭС, они могут работать в довольно сложных условиях и не течь даже в случае повреждения. Их основным недостатком по сравнению с жидкостными батареями является высокая стоимость (они стоят в 2–3 раза больше) [1].

Чтобы определить количество аккумуляторных батарей, необходимо рассчитать избыточную энергию при выработке электроэнергии через ФЭС. Превышение производства электроэнергии от ФЭС по отношению к потреблению происходит в течение всех сезонов, но только весна и лето имеют ярко выраженное превышение. Основываясь на методике расчета [3], мы должны рассмотреть самый солнечный сезон за один модулируемый год. Модуляция MatLab показывает, что весна имеет максимум инсоляции, по причине отсутствия облачности в течение сезона. Превышение энергии генерации за весенний сезон составляет 141,1 кВт·ч/сутки.

Расчет емкости блока аккумуляторных батарей с учетом допустимой глубины разряда (блок состоит из четырех батарей, подключенных последовательно) определяется по выражению:

$$W_{АКБ} = U_{ном}^{АКБ} \cdot C_{ном}^{АКБ} \cdot k_p, \quad (16)$$

где $U_{ном}^{АКБ}$ – номинальное напряжение аккумуляторной батареи, В, $C_{ном}^{АКБ}$ – номинальная емкость аккумулятора, А·ч, k_p – ограничение глубины разряда аккумуляторной батареи на уровне не менее 40%. Для моделирования была выбрана батарея Delta DTM 12250 L [81], которая имеет следующие параметры:

Таблица 7 – Параметры аккумуляторной батареи Delta DTM 12250 L

Параметр	Значение
Номинальная емкость	250 А·ч
Номинальное напряжение	12 В
Срок службы	10 лет
Величина саморазряда	3% в течение месяца
Максимальный ток заряда	75 А
Максимальный ток разряда	1250 А
Номинальный диапазон рабочих температур	-20...+60 °С
Габариты	520 x 269 x 227 мм
Вес	74 кг
Тип	AGM

Согласно уравнению (16) максимальная накопленная энергия с ограничением 40% составит 4,8 кВт·ч для одной батареи Delta DTM 12250 L. После этого замечания, мы можем свести вычисления к определению количества блоков в соответствии со следующим уравнением:

$$N_{\text{блок}} = \frac{W_{\text{АКБ}}^{\text{сверх}}}{W_{\text{АКБ}}} = \frac{141,1}{4,8} = 29,39 \approx 30. \quad (17)$$

На основании Рисунка 36 порядок подключения аккумуляторных батарей будет таким же, как и для солнечных батарей. Четыре батареи последовательно соединены в тридцать блоков параллельных массивов. Один массив будет состоять из сорока батарей с одним инвертором. Тот же принцип будет для оставшейся части инверторов. Наконец, количество аккумуляторных батарей будет составлять 120 штук.

3.1.5 Дизельная электрическая станция

В соответствии с информацией, раскрытой в второй главе данной диссертации, дизель-генераторы являются очень популярным вариантом не только для автономного питания, но и для широкого спектра других случаев: аварийный источник электроснабжения, важная составляющая часть гибридных систем. Этот спектр приводит к широко представленному рынку различных поставщиков ДЭС, имеющие различные варианты установленной мощности и подключаемой электроники. Дизель-генераторы производятся в открытом или закрытом контейнере и могут устанавливаться на разные участки с различными условиями эксплуатации.

В данной работе было принято решение снабдить поселение двумя новыми единицами дизель-генераторов. Они могут покрывать требуемую нагрузку, где два из них составляют по 16 кВт (один в резерве) и уже установленный 60 кВт соответственно. Согласно информации из первой главы, с. Токма имеет дизельный генератор мощностью 30 кВт с неудовлетворительным

состоянием работы. Два дизельных генератора мощностью 16 кВт будут установлены вместо 30 кВт. Эта замена, основанная на интеграции новых источников (ФЭС и аккумуляторных батарей), ведет к увеличению нагрузки дизельного генератора. Это означает, что оптимальное соотношение нагрузки дизельного генератора будет составлять от 40% до 80% в отличие от старого дизельного генератора мощностью 30 кВт, который загружается с ВИЭ менее чем на 30%.

Представленный дизельный генератор имеет ряд важных параметров, которые будут приняты для будущих расчетов экономических выгод. Данная информация оформлена в следующей таблице:

Таблица 8 – Параметры ДЭС АД-16-Т400-Р1 [82]

Параметр	Значение
Номинальная мощность	16 кВт
Оперативный резерв	18 кВт
Выходной ток	3-фазный/ 400 В/ 50 Гц
Расход топлива (75% загрузки)	5,2 л/ч
Объем топливного бака	200 л
Автономный режим работы	38,6 ч
Габариты	1810 x 1020 x 1550 мм
Вес	950 кг
Удельный расход топлива (100% загрузки)	220 г/кВт·ч

Как показано в Таблице 8, для гибридной системы этот дизель-генератор отвечает всем требованиям. Соотношение нагрузки находится в пределах 40–80%, и мы можем использовать этот генератор для моделирования. Он будет работать для всего диапазона эффективно. Дизель-генератор – это легко регулируемый источник энергии для поселения. Однако в случае, если нагрузка увеличится, потребуется новое оборудование, поскольку существующий генератор будет работать в условиях, близких к номинальной мощности большую часть времени.



Рисунок 38 – Дизельная электростанция АД-16-Т400-Р1 [82]

Общая контрольная цена дизель-генераторов составит около 14 610 долларов США [82] (для резерва и основной ДЭС). Эта цена будет использоваться далее для расчета инвестиционных затрат.

3.2 Результаты технико-экономического анализа

Отклонения напряжения не должны превышать 10% от уровня, установленного Государственным стандартом [83]. Когда ДЭС используется без ФЭС, мы обнаруживаем, что уровень напряжения в конце линии передачи уменьшается на 6% и 5% в зимнее и летнее время соответственно. Дополнительный источник питания в виде ФЭС помогает перераспределять электроэнергию между ДЭС и ФЭС. В соответствии с этим воздействием, результатом является изменение текущего значения напряжения на различных участках линии передачи. Эта интеграция уменьшает потери мощности в проводниках и обеспечивает большую стабильность напряжения в точках подключения потребителей электроэнергии.

Результат отклонения напряжения в автономной системе с ФЭС и без ФЭС суммирован в таблице ниже:

Таблица 9 – Результаты сокращения отклонений напряжения

Фаза моделируемого дня	Единая ФЭС			
	Зимнее отклонение, %		Летнее отклонение, %	
	С ФЭС	Без ФЭС	С ФЭС	Без ФЭС
Ночь	1,82	1,82	1,36	1,36
Утро	0,45	5,91	0,45	4,55
День	0,45	2,73	0,45	2,27
Вечер	1,36	14,09	0,91	11,82

Необходимо добавить еще один результат распределенного монтажного исполнения ФЭС по всей длине линии электропередачи. Эта интеграция состоит из нескольких небольших ФЭС с определенным количеством солнечных панелей. Количество солнечных панелей было принято на основе пропорциональной величины потребления каждой нагрузки. Когда напряжение подается, в линии электропередачи течет ненулевой ток, который прямо пропорционален потребляемой мощности поселения в определенный час. Внутри линии передачи имеется постоянное электрическое поле, которое приводит в движение заряды вдоль проводника. Электрическое поле проводника (линии передачи) всегда направлено на уменьшающийся потенциал, или можно сказать, что электрическое поле – это минус градиента потенциала. Результаты моделирования показали, что чем ближе к источнику напряжения, тем больше потенциал проводящей поверхности. Соответствующий вариант с распределенным монтажным исполнением ФЭС вдоль линии передачи в виде малых станций показал практически те же результаты, что и при единой ФЭС. Этот вариант требует большего количества оборудования и может быть оправдан только с положительным экономическим обоснованием.

Результаты показали, что использование мощности от единой ФЭС с аккумуляторными батареями на величине половины номинальной нагрузки

системы уменьшит падение напряжения в конце линии на 4–10%. Это достигается подключением ФЭС на расстояние от ДЭС, которое составляет не менее половины общей длины линии электропередачи [20]. Значительно сокращается также величина потерь. Это сокращение за каждый сезон приводится в следующей таблице:

Таблица 10 – Результаты сокращения потерь электроэнергии в линии

Сезон	Сокращение, %
Зима	-7,8
Весна	-4,1
Лето	-2,8
Осень	-5,4

Эффективность использования ФЭС в АСЭС без систем хранения энергии существенно ограничена условиями работы сетевых инверторов. Чтобы стабилизировать напряжение в энергосистеме и уменьшить потери электроэнергии, рекомендуется использовать ФЭС с системами хранения энергии и подключать их ближе к концу линии распределения или к точке подключения самого мощного потребителя. Мощность генерации ФЭС ограничена половиной максимальной мощности потребления электроэнергии [20].

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ6Е	Муравьев Дмитрий Игоревич

Школа	ИШЭ	Отделение	ОЭЭ
Уровень образования	магистр	Направление	13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов: материально-технических, энергетических, финансовых, и человеческих.	Стоимость материальных затрат, оплаты труда, прочие затраты.
2. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования.	Отчисления на социальные нужды и амортизационные отчисления.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Технико-экономическое сравнение вариантов
2. Оплата услуг персонала
3. Затраты на проведение строительно-монтажных работ

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. Сметы инвестиционных затрат, издержек проекта
2. Диаграммы финансовых потоков проекта
3. Характеристика анализа чувствительности проекта

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН	Фигурко Аркадий Альбертович	к.э.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Е	Муравьев Дмитрий Игоревич		

4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

В данной главе, согласно полученным данным о снижении потерь в линиях электропередач и увеличении напряжения, представлена экономическая модель. Глава включает расчет сэкономленных затрат на потребление топлива и затраты на распределение потерь, расчет инвестиций проекта, издержек производства, чистой приведенной стоимости (ЧПС) и анализ чувствительности.

4.1 Снижение расхода топлива от дизельной электростанции

Интеграция ФЭС в ДЭС будет экономически жизнеспособной только в том случае, если сметные затраты на ВИЭ сопоставимы со стоимостью сэкономленного топлива и стоимостью потерь. Эффективность установок для ВИЭ во многом определяется потенциалом первичного энергоресурса: чем больше часов работы установки в год, тем больше экономия топлива от ДЭС и тем меньше затраты на ремонт и обслуживание. Стоимость дизельного топлива, включая стоимость его доставки, а также затраты на техническое обслуживание и профилактику ДЭС, в значительной степени определяют эффективность совместной работы источников энергии.

Абсолютное потребление топлива дизель-генератором для электроснабжения на каждом i -м часе суточного графика определяется по формуле [1]:

$$G_i = K_{xx} \cdot G_{ном} + (1 - K_{xx}) \cdot G_{ном} \cdot \frac{P_i}{P_{ном}}, \quad (18)$$

где G_i , $G_{ном}$ – действительный за час и номинальный расход топлива; P_i , $P_{ном}$ – фактическая за час и номинальная мощность ДЭС; K_{xx} – коэффициент, характеризующий расход дизельного топлива в режиме холостого хода ($K_{xx} \sim 0,3$).

На основе уравнения (18) можно определить количество потребляемого топлива в течение рассматриваемого периода. Количество обеспечивается за счет удельного расхода дизельного топлива для соответствующих условий нагрузки и количества произведенной электроэнергии. Полученная информация должна быть преобразована в график баланса энергии за каждый сезон.

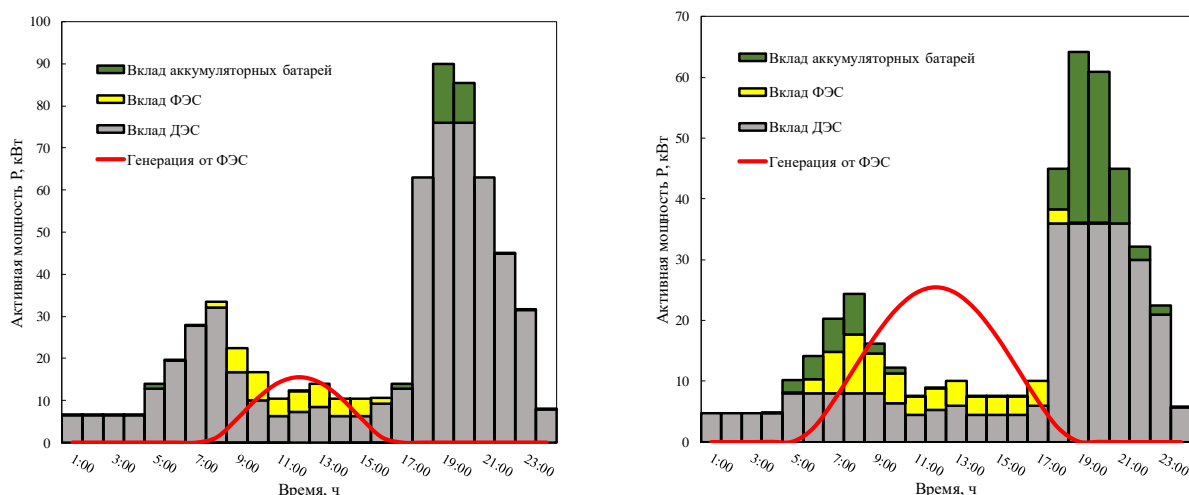


Рисунок 39 – Вклад в энергетический баланс от ДЭС, ФЭС и батарей в летнее время (справа) и в зимнее время (слева)

Результаты расчетов, основанные на моделировании потребления дизельного топлива, показали, что ожидаемый объем экономии топлива составляет 27%, а уменьшение потерь – около 25% в год. Учитывая стоимость одного кВт·ч дизельного топлива как 16,21 рубля, а тариф на производство электроэнергии от ДЭС в с. Токма – 44,87 руб./кВт·ч [84], общая стоимость сэкономленной энергии от потерь в год будут составлять 19 485,93 рубля.

4.2 Капитальные инвестиции

Общие инвестиции, включая транспортировку, первоначальный ввод в эксплуатацию, проектные и изыскательские работы, эксплуатационные расходы и оборудование, показаны на Рисунке 40, что касается амортизационных издержек, то основные средства в России, поддающиеся амортизации делятся на две формы: налогооблагаемые и необлагаемые налогом активы [87]. Налогооблагаемые активы подразделяются на группы, в зависимости от срока

службы единицы, которые определяются спецификациями оборудования [87].
Определенный срок службы оборудования устанавливается на временной горизонт проекта, который составляет 20 лет (солнечные батареи, дизель-генераторы, линии электропередач и др.). Срок службы аккумуляторных батарей составляет десять лет, система управления и инвертор – пять лет соответственно. Все эти пункты будут поддаваться реинвестициям в соответствии с временным горизонтом.

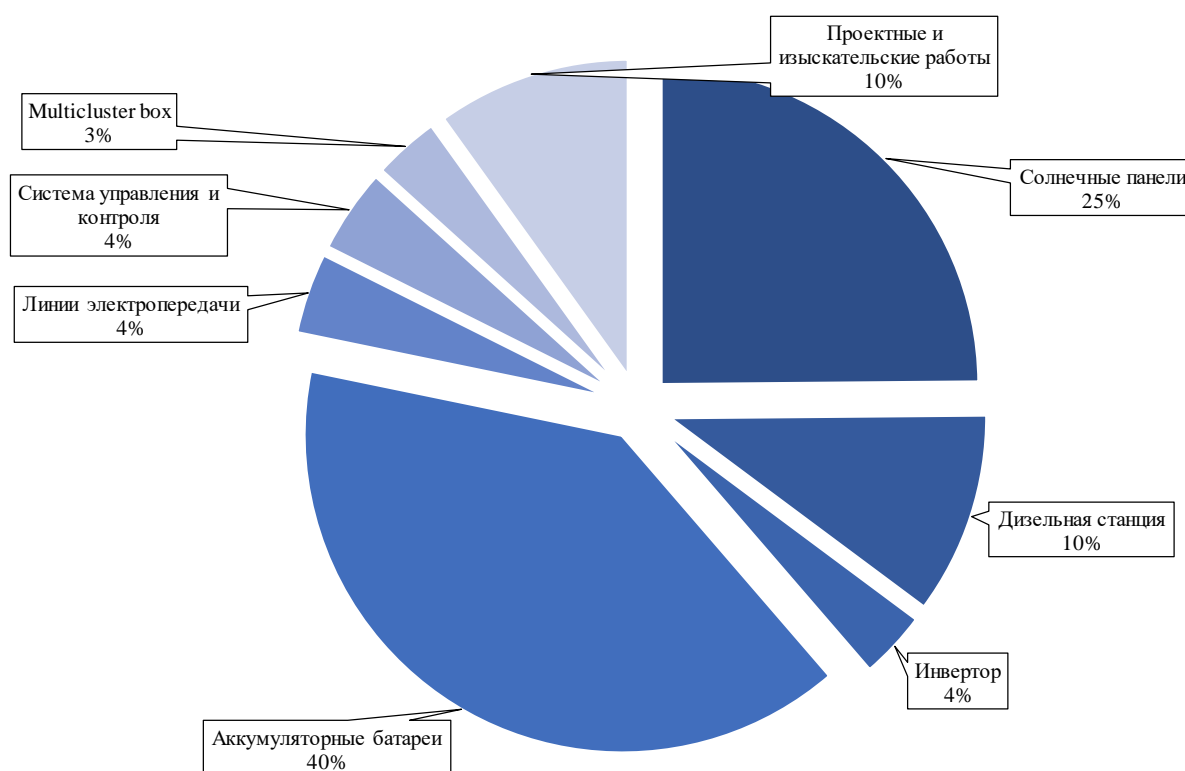


Рисунок 40 – Капитальные вложения для интеграции фотоэлектрической станции

Как показано на Рисунке 40, основная часть инвестиций идет на установку солнечных панелей и аккумуляторных батарей. Однако, мы должны учитывать, что дизель-генераторы имеют высокие эксплуатационные расходы из-за топливного компонента. Расходы на эксплуатацию и техническое обслуживание оцениваются в следующем подразделе.

4.3 Амортизационные отчисления

Российское законодательство допускает два вида амортизации – прямолинейный и ускоренный [88]. Кроме того, нецелесообразно изменять тип амортизации и применять разные методы амортизации к различным единицам в одной группе активов. Большинство основных активов относятся к восьмой группе амортизации (солнечные батареи, дизель-генераторы, линии электропередачи и multicluster box) со сроком службы около двадцати лет. Батарейная система относится к шестой группе с продолжительностью жизни около десяти лет, инвертор и система управления относятся к третьей группе. Это означает, что мы будем использовать прямолинейный метод амортизации по следующему уравнению:

$$\begin{cases} \text{Амортизация}_{\text{год}}^l = \frac{\text{Инвестиции}}{2 \cdot T - 1} \\ \text{Амортизация}_{\text{год}}^n = \frac{2 \cdot \text{Инвестиции}}{2 \cdot T - 1} \end{cases}, \quad (19)$$

где *Инвестиции* – общая сумма денег, которая требуется для интеграции ФЭС в АСЭС (8 641 540 рублей), *T* – срок полезного использования для каждой единицы инвестиций в зависимости от группы амортизации.

4.4 Переменные, эксплуатационные и постоянные издержки

По словам производителя солнечной панели TSM–200, каждый год эксплуатации солнечная панель теряет 0,5–1% производства электроэнергии [69]. Это гарантирует покупателю, что через 20–25 лет его солнечная установка будет производить 80–85% установленной мощности. И даже после этого двадцатилетнего срока службы солнечная панель сразу же не подведет. Установка будет продолжать работать десятилетиями, но с немного худшими характеристиками. Для предполагаемого временного горизонта солнечных элементов, вероятно, изменится два или даже три инвертора.

Этот фактор деградации уже включен в экономическую модель. Ежегодное обслуживание солнечных панелей включает в себя: проверку состояния солнечных панелей, контактов и изоляции подключения соединительных кабелей, тестирование и очистку инвертора от пыли, проверку систем крепления на коррозию или болтовых соединений, проверку эффективности заземления и очистка поверхности солнечной панели от грязи и снега. Стоимость обслуживания солнечных панелей составляет 2% от инвестиций солнечных панелей в год.

Техническое обслуживание аккумуляторных батарей используется в размере 1,5% от инвестиций в них раз в два года. Для дизель-генератора ежегодное техническое обслуживание оценивается в 5% от его стоимости [89]. Мы также должны учитывать основные эксплуатационные расходы – годовую цену на топливо для дизель-генератора. Чтобы найти количество топлива, мы смоделировали систему на все времена года и получили количество потребляемого топлива. В зимний период потребляемое топливо составляет 15,6 тонн дизель-генераторами без ФЭС (с ФЭС составляет 12,95 тонны). В летний сезон потребляемое топливо составляет 5,42 тонны без ФЭС (с ФЭС составляет 2,8 тонны). Цена на топливо оценивается в 16,21 рубля за 1 кВт·ч. Таким образом, общие расходы на топливо составляют 3 425 207,9 рублей в год с учетом последующего роста эскалации цены.

4.5 Инфляция, эскалация и деэскалация

Чтобы обеспечить достоверность результатов в экономической модели, нам необходимо определить темпы роста/снижения цен на услуги и товары. Эти значения используются для увеличения или снижения денежных потоков за период действия проекта. Ожидается, что аренда и налоги будут расти примерно со скоростью инфляции, которая показана на Рисунке 41, текущая норма которой составляет 2,4% (это показатель электроэнергии) [91].

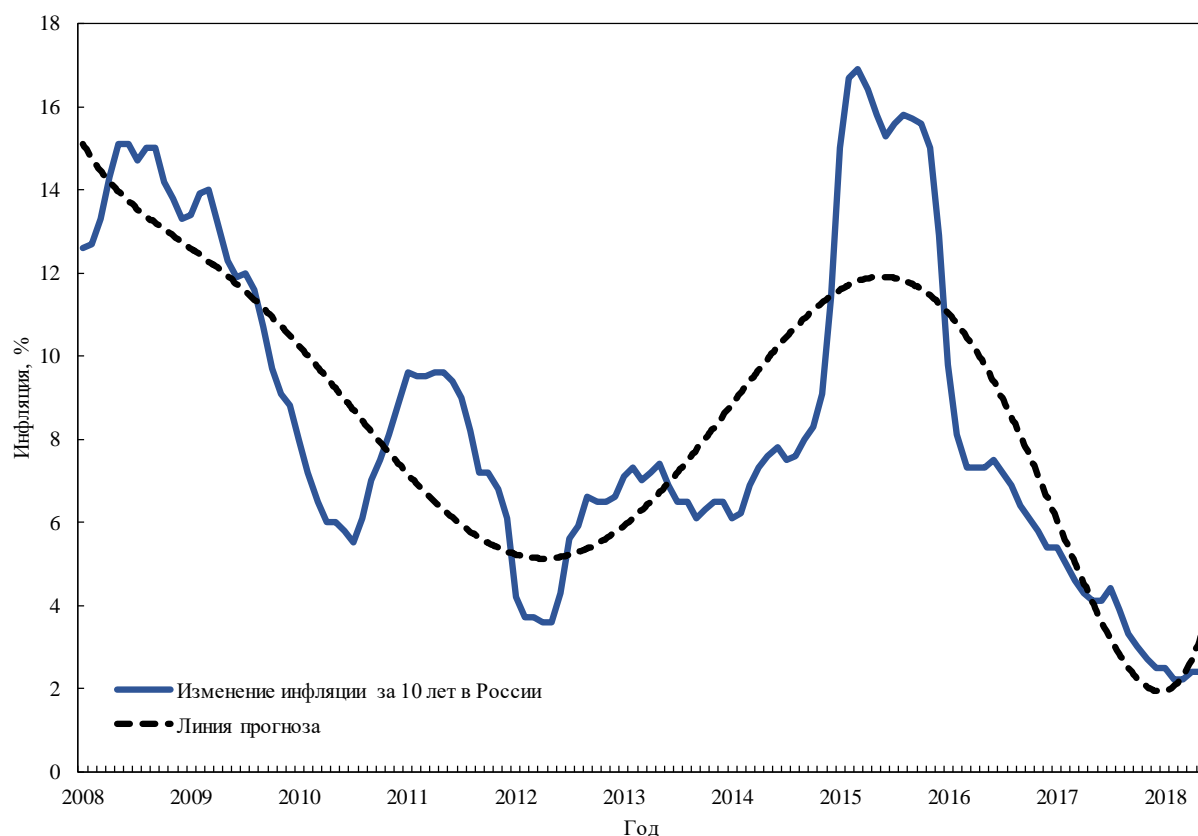


Рисунок 41 – Годовые темпы изменения инфляции в России

Анализ статистических источников и отчетов глобальных макромоделей торговой теории и экспертная оценка аналитиков [91] прогнозируют, что инфляция составит 4,1% из-за сложной экономической ситуации в мире, которая ограничивает цену на основной экспорт России в долгосрочных операционных проектах. Как правило, скорость роста заработной платы несколько выше, чем темп инфляции. По прогнозам, в долгосрочной перспективе рост реальной заработной платы в России составит около 5% в 2020 году, согласно эконометрическим расчетам.

Изменение цены на дизельное топливо является едва ли не самым трудно прогнозируемым параметром (см. Рисунок 42). Важный факт, что наибольшая часть его цены зависит от транспортировки в регион (в нашем случае – Иркутская область). Анализируя данные, предоставленные Российской экономической школой, мы установили скорость эскалации топлива до 7,41%.

Это значение было получено на основе десятилетнего наблюдения за каждым месяцем и формализовано в следующее уравнение:

$$g_{\text{топливо}} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\left(\frac{1}{T-1} \right)} - 1, \quad (20)$$

где $g_{\text{топливо}}$ – месячный темп роста цен на дизельное топливо; P_1, P_2 – показатель индикатора текущего периода и базового периода; T – количество периодов.

Согласно уравнению (20), мы можем оценить годовую эскалацию цены на дизельное топливо:

$$(1 + g_{\text{топливо}})^{12} - 1. \quad (21)$$

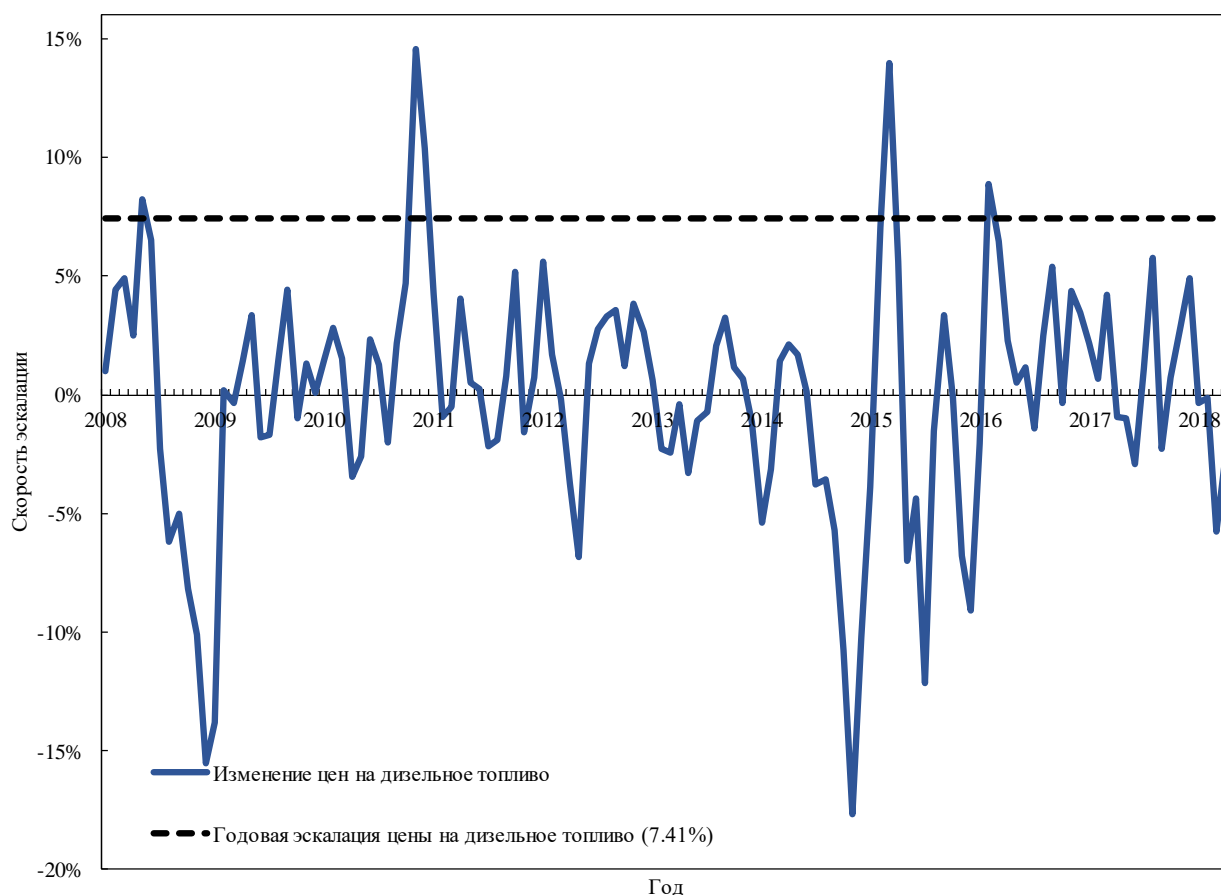


Рисунок 42 – Месячное изменение цены на дизельное топливо в России с 2008 по 2018 года

Прогресс в фотоэлектрических технологиях также заслуживает внимания. Недавние технические разработки и сокращение издержек по всем основным категориям технологий производства солнечной энергии были достаточно значительными. Во-первых, исторические затраты показаны на Рисунке 43, где в начале 1970-х годов затраты на солнечные модули составляли несколько сотен тысяч долларов США за кВт пик, а заявки в основном ограничивались аэрокосмической и другой специализированной сферой применения. К началу 1980-х годов затраты упали в десять раз до, примерно, 25 000–50 000 долларов США/кВт·ч, а к 1990 году до 6 000 долларов США/кВт·ч. ФЭС стали коммерчески жизнеспособными для всего диапазона мелких пользователей (особенно для децентрализованных системы снабжения) [92].

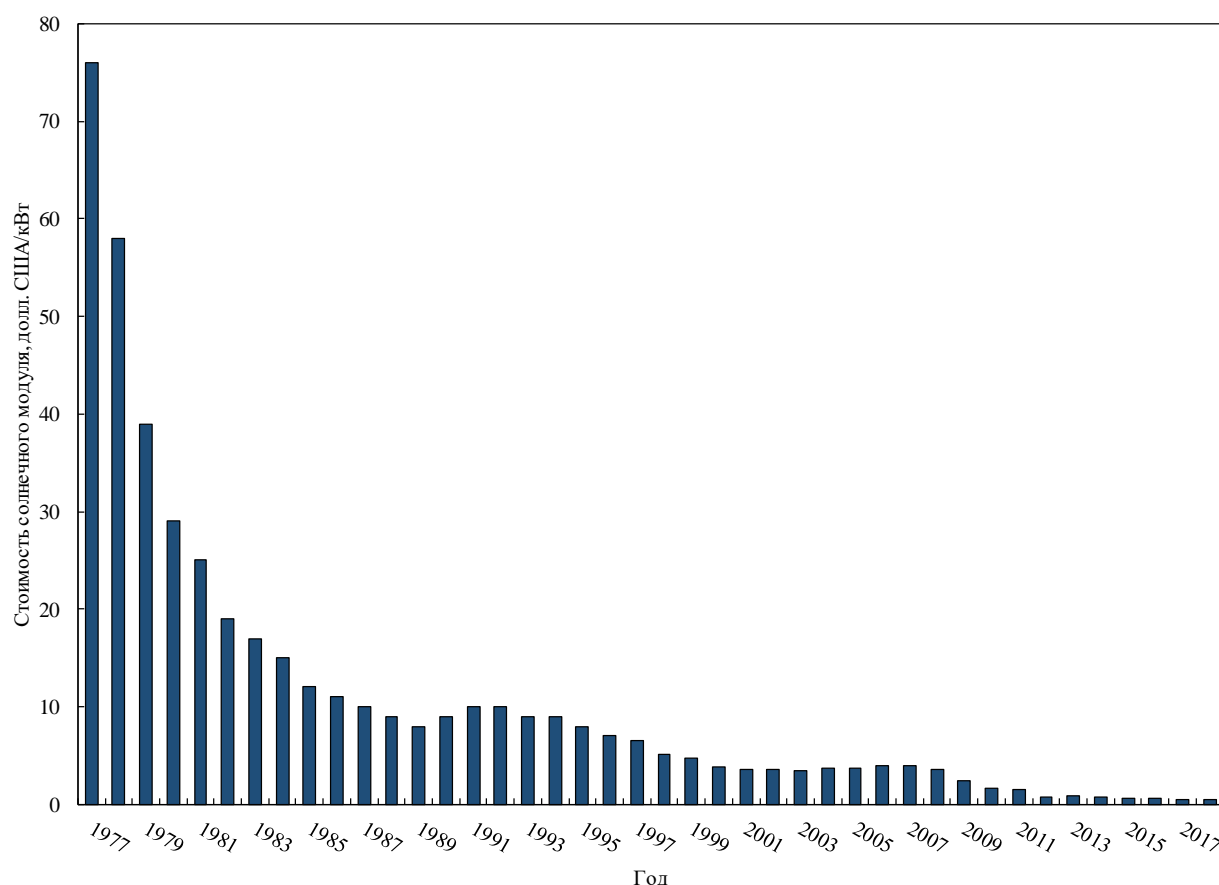


Рисунок 43 – Стоимость фотоэлектрических модулей с 1976 по 2017 года [92]

Исходя из этих совокупных данных, мы можем определить рост деэскалации. Одно очень важное замечание должно быть раскрыто в нашем случае экономической модели. Речь идет о десятилетиях наблюдений. Нет

сомнений в том, что солнечные энергетические системы – это довольно новые технологии, прогресс которых продвигается очень быстро. Нам нужно учитывать факт цен на солнечные модули за соответствующий период нашей финансовой модели. Для наблюдения можно выбрать только последние семь лет. Этот период наблюдения имеет форму кривой, которая близка к плоской линии, она будет “защищать” нашу модель от предыдущих падений цен. Согласно этому предположению, мы получим действительный рост деэскалации в течение последнего десятилетия с временным зависимым уровнем цен.

Используется тот же принцип деэскалации цен на солнечные панели. Для нашего случая мы взяли период между 2018 и 2017 годами. Расчет цены деэскалации солнечной панели по уравнениям (20) и (21) получил значение – 7,22% в год. Все изменения представлены на Рисунке 44 с оценкой скорости деэскалации цены.

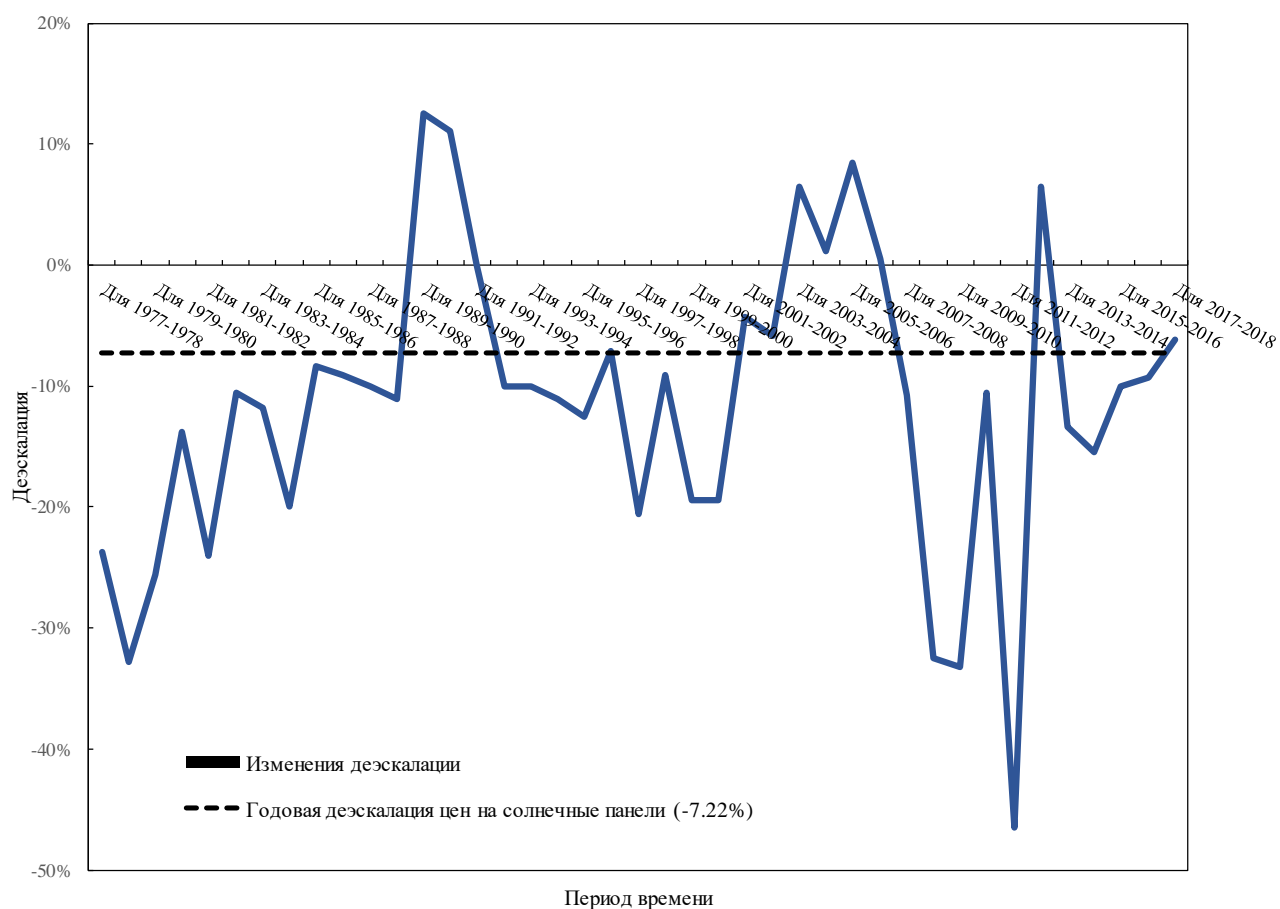


Рисунок 44 – Изменение цены солнечных панелей с 1977 по 2018 год

События в течение прошлого века в области солнечных технологий были в значительной степени стимулированы высокими ценами на нефть в период 1973–1985 годов и вызвали интерес нескольких крупных компаний. Крах цен на нефть в середине 1980-х годов привел к тому, что некоторые компании сократили свои планы инвестиций, а в некоторых случаях даже отложили их, но те, которые продолжали свои программы, сократили расходы на суммы, сопоставимые с падением цен на нефть. Таким образом, поскольку реальные цены на нефть упали на 75% в период между 1980 и 1992 годами (с 60 долл. США до 20 долл. США за баррель), то из солнечных модулей упали примерно на 80% [92, 100].

Потребление в поселении будет постоянным. Это предположение было взято из данных роста численности населения [38], где в течение пяти лет численность не изменялась. Необходимо сказать, что в регионе не планируется никакой дополнительной промышленности помимо той, которая уже эксплуатируется. Прибыль компании рассчитывается на уровне корпоративного налога в размере 20%. С 2017 по 2020 год 3% зачисляется в федеральный бюджет, 17% – в бюджет субъекта России.

4.6 Модель ценообразования капитальных активов

Для оценки ставки дисконтирования для проекта интеграции ФЭС, мы используем модель ценообразования капитальных активов (Capital Asset Pricing Model, CAPM). Данной модели требуется три основных компонента: безрисковая ставка, рыночная премия и бета-коэффициент. Ожидается, что это будет муниципальный проект, где основной задачей является внедрение гибридной системы электроснабжения, а не получение прибыли. Именно поэтому мы принимаем значительно более низкую ставку дисконтирования, чем ставка дисконтирования 11%, принятую на основе исследований рынка смежных проектов [92].

1. Для безрисковой ставки мы используем национальные облигации России [93], которые в настоящее время предлагают 5,5% для облигаций Россия-2043.

2. Для премии за рыночный риск мы используем исследование, проведенное STATISTA [94], где средняя премия рыночного риска в России определена для периода с 2011 по 2016 года. По оценкам, премия за рыночный риск для России составляет около 7,9%.

3. Для бета-коэффициента мы используем данные Московской биржи (MOEX) [95]. Мы выбираем необлагаемую кредитом бету в России для электроэнергетического сектора, значение которой – 0,89.

Ставка дисконтирования для моделируемого проекта описывается следующим уравнением:

$$r_{CAPM} = r_f + \beta \cdot (r_m - r_f) = 5,5 + 0,89 \cdot (7,9 - 5,5) = 7,6\% . \quad (22)$$

Агрегировав все данные, мы создаем экономическую модель проекта в пакете программы Excel. Данную модель мы будем использовать для расчета эффективности инвестиций и, в основном, инвестиций в распределенную систему ФЭС.

4.7 Результаты экономической модели и анализ чувствительности

Экономические модели для оценки возможного будущего влияния на цену основаны на анализе денежных потоков (CF) проектов, ориентированных на производство из АСЭС с распределенной системой ФЭС. Такие экономические модели должны отражать весь необходимый процесс и весь проектный цикл, рыночные цены на отдельные ресурсы, ожидаемые доходности ФЭС и альтернативные издержки, включая правильную временную стоимость денег [86]. Инвестиционные критерии показывают эффективность инвестиций. Мы будем использовать стандартные критерии инвестиций, такие как ЧПС, дисконтированный срок окупаемости и ВНД.

Экономическая модель в нашем случае применяет метод доходности активов, основанный на модели CAPM. Это означает, что нам нужно использовать анализ ЧПС. Инвестор принимает предпринимательский проект только в том случае, если проект ЧПС больше или, по крайней мере, равен нулю. ЧПС, равный нулю, означает, что инвестор получает ту же норму прибыли, что и в случае других возможных альтернативных инвестиций – и, следовательно, ЧПС, равный нулю, представляет собой границу для принятия проекта.

Стандартная финансовая модель проектов основана на оценке ЧПС по проектам. Но формулу ЧПС можно применять в обратном порядке, например, чтобы установить ЧПС проекта на нуль (это определение ВНД), а затем найти снижение цены на электроэнергию для с. Токма. Эта цена представляет собой выгоду от распределенной интеграции фотоэлектричества (снижение затрат на топливо, уменьшение потерь при передаче и т. д.).

Уравнение цены электроэнергии в с. Токма представлено из уравнения ЧПС:

$$NPV = \sum_{t=1}^T CF_t \cdot (1 + r_{CAPM})^{-t} = \sum_{t=1}^T (p_{нов,t} \cdot Q_t + S_t - E_t) \cdot (1 + IRR)^{-t} = 0, \quad (23)$$

где t – год реализации проекта, r_{CAPM} – ставка дисконтирования, которая рассчитывается по модели CAPM, $p_{нов,t}$ – новая цена электроэнергии для с. Токма в году t [руб./кВт·ч], CF_t – денежный поток проекта в год t [руб.], Q_t – количество энергии потребляемое с. Токма [кВт·ч/год], S_t – выгоды от интеграции ФЭС (субсидия, сокращение затрат на топливо, сокращение потерь на передачу электроэнергии) [руб.], E_t – проектные расходы в год t [руб.], T – временной горизонт проекта [лет].

Расчетное ЧПС для проекта составляет около 1 336 165,4 рублей. Эта оценка несколько расплывчата из-за стохастического поведения многих входных параметров, но дает нам важную инвестиционную информацию о том, что инвестиции в этот проект являются прибыльными, поскольку ЧПС больше нуля.

Однако цена, используемая для продажи электроэнергии, исключительно высока, потому что мы используем сумму, полученную из случая без интеграции ФЭС.

Чтобы найти новую цену за электричество, мы используем анализ Excel Solver. Мы установили ячейку с нулевым значением ЧПС и изменили стоимость электроэнергии. Таким образом мы показываем, какова цена, которую мы можем предложить потребителям, удовлетворяя норму прибыли, которую запрашивают инвесторы. Результаты анализа дают нам новую сумму для жителей с. Токма 41,1 рубля за кВт·ч. Эта цена по-прежнему выше, чем цена для потребителей, подключенных к сети. Тем не менее, интеграция распределенной системы фотоэлектрической генерации в АСЭС дает снижение цены на 8,4%, преимущественно для транспортных расходов на топливо. Это означает, что общая экономия для потребителей на 2019 год составит 794 496 рублей, что является очень позитивным результатом.

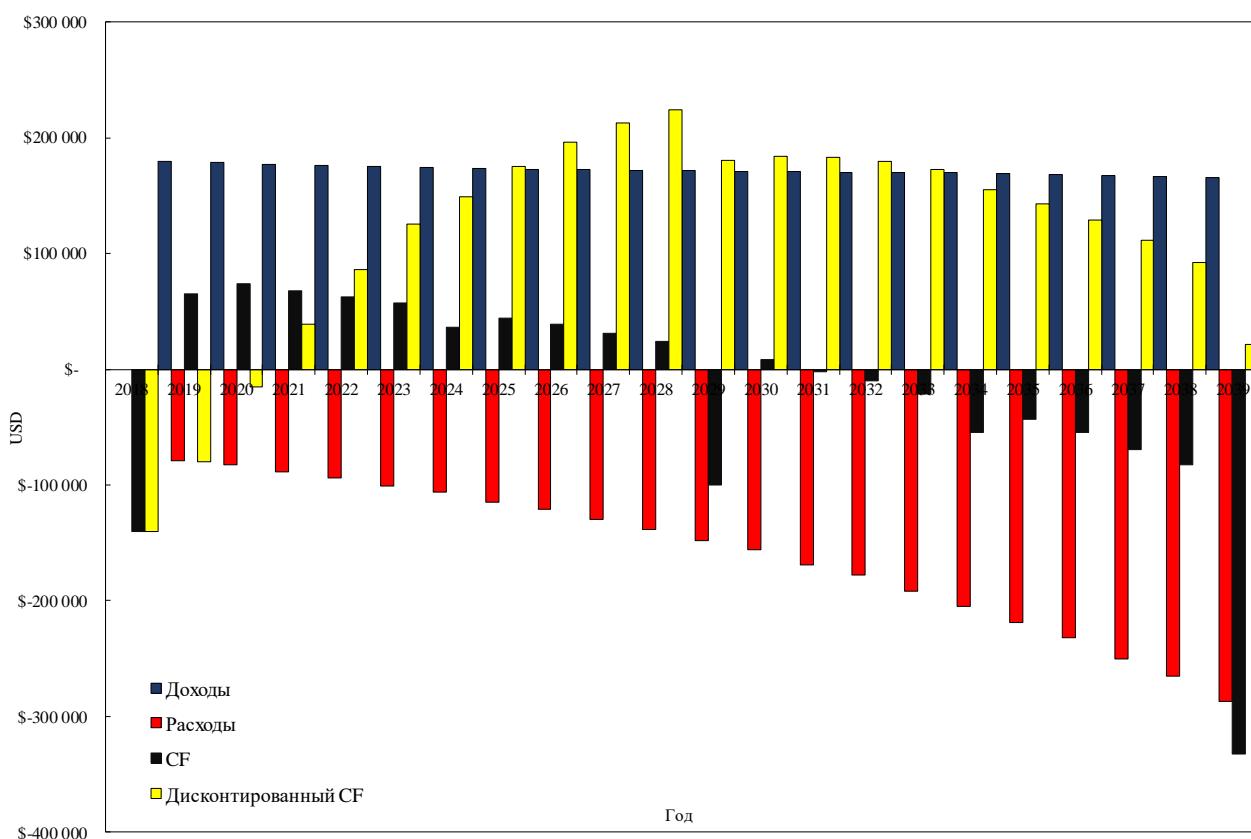


Рисунок 45 – Расходы, доходы, денежный поток и распределение накопленного денежного потока в течение всего временного горизонта

Необходимо отметить, что на Рисунке 45 значения рассчитывались на релевантный курс 61,6 рубля за один доллар США. Дисконтированный срок окупаемости – это процедура капитального бюджетирования, используемая для определения рентабельности проекта [96]. В отличие от анализа ЧПС, который обеспечивает общую денежную стоимость проекта, дисконтированный срок окупаемости дает количество лет, которое требуется для того, чтобы не допустить первоначальных расходов. Эта процедура аналогична периоду окупаемости, но период окупаемости определяет только, сколько времени потребуется для возврата первоначального оттока денежных средств, игнорируя временную стоимость денег. Для базовой цены электроэнергии дисконтированный срок окупаемости составляет всего около двух с половиной лет, что свидетельствует о привлекательности проекта.

Анализ чувствительности проекта позволяет оценить, как результирующие показатели реализации проекта, например ЧПС, ВНД, изменяются для разных значений указанных переменных, необходимых для расчета. Этот тип анализа позволяет нам идентифицировать наиболее важные переменные, которые могут оказать самое значительное влияние на осуществимость и эффективность проекта. Это особенно важно при планировании такого долгосрочного проекта. Некоторые из параметров могут значительно измениться в течение срока действия проекта, и мы должны знать об оценке этих изменений.

Ставка дисконтирования является одним из наиболее важных факторов. Если этот проект будет рассматриваться как обеспечивающий минимальную возможную цену на электроэнергию, ставка дисконтирования является единственным способом удовлетворения потребностей инвесторов. Поэтому мы должны тщательно определить ставку дисконтирования и внутреннюю норму доходности. Поскольку мы сейчас рассчитываем, что цена на электроэнергию равна 41,11 руб., внутренняя норма прибыли будет очень близка к используемой ставке дисконтирования, которая определяется моделью CAPM. Чтобы

увеличить его, нам нужно повысить цену на электроэнергию, поскольку это единственный положительный денежный поток при работе над проектом. Зависимость ЧПС от ставки дисконтирования представлена на Рисунке 46, где мы можем видеть значение ВНД – пересечение кривой с горизонтальной осью.

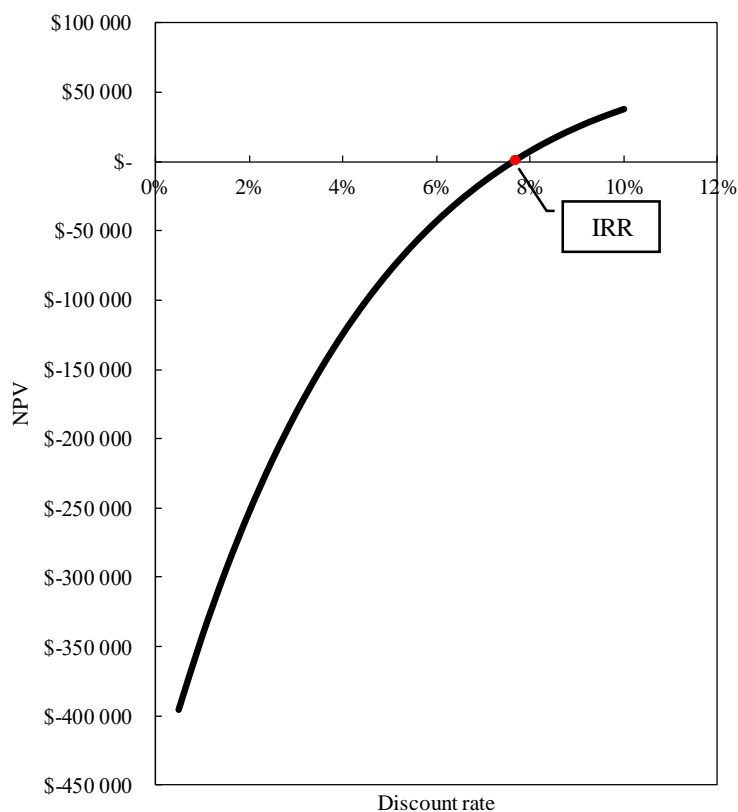


Рисунок 46 – Зависимость ЧПС (NPV) и ставки дисконтирования (discount rate)

Рисунок 46 показал, что при каждом повышении ставки дисконтирования ЧПС набирает денежную величину. Дисконтирование – это процесс определения текущей стоимости платежа или потока платежей, который должен быть получен в будущем. Хорошо описал данный процесс о временной стоимости денег И. Уэлч, где рубль сегодня стоит больше, чем завтра. [97]. ЧПС и прибыль проекта значительно увеличиваются с увеличением учетной ставки. Эта зависимость коррелирует со скоростью эскалации цены на топливо. Дело в том, что чем выше цена на топливо, тем выше выгоды, которые получит от этого проект. Это предложение может быть истолковано в другом значении. Уже достигнутый прирост темпов роста цен на дизельное топливо 7,41% дает нам гибкость изменения цены.

На Рисунке 47 показано, как цена дизельного топлива от ДЭС влияет на производительность проекта:

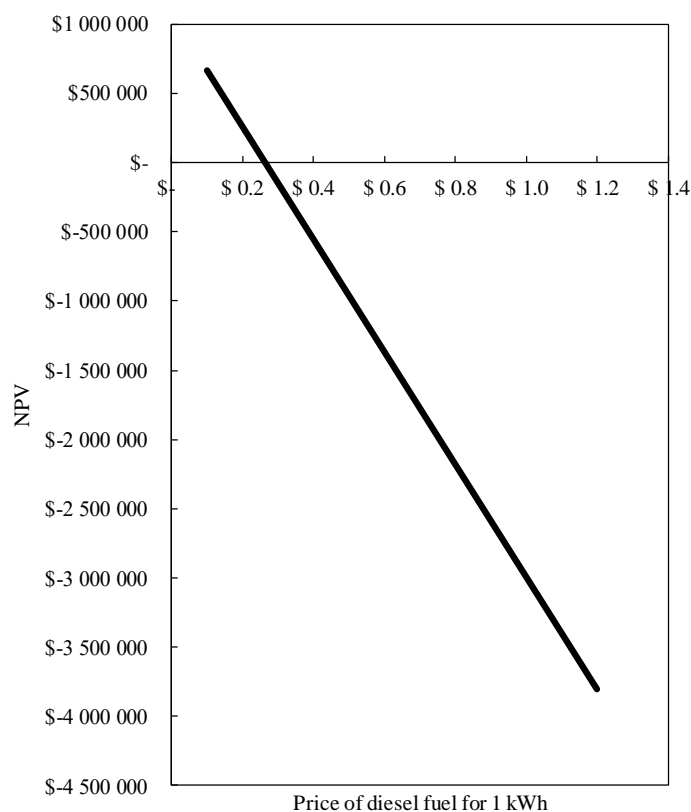


Рисунок 47 – Зависимость ЧПС и цены на дизельное топливо

В настоящее время электроснабжение в поселении обеспечивается дизельным генератором. Одной из причин, почему это так дорого, является высокая стоимость топлива и особенно транспортные издержки. Мы можем проанализировать, насколько это затратно и как это существенно влияет на результат ЧПС в с. Токма. Согласно Рисунку 48, существует определенное влияние цены топлива на ЧПС проекта. Однако распределенная фотоэлектрическая генерация предназначена для минимизации зависимости от топлива. ФЭС генерирует высокую долю энергии, и в случае гораздо более высокого спроса мы можем увеличить площадь ФЭС. Это будет нашим преимуществом гибкости от интеграции ФЭС.

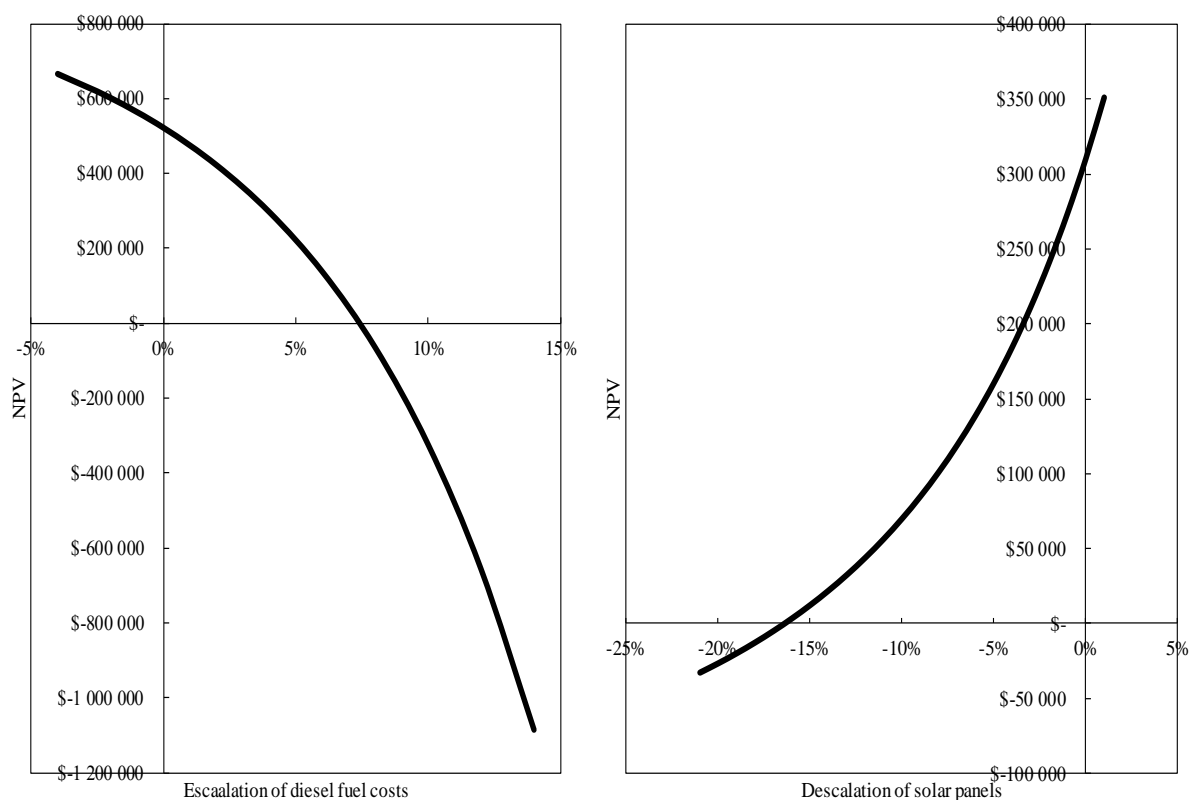


Рисунок 48 – Зависимость ЧПС и эскалации стоимости дизельного топлива (слева), деэскалация солнечных панелей (справа)

На Рисунке 48 показана интересная корреляция. Эскалация затрат определяется как изменение стоимости или цены конкретных товаров или услуг в конкретном рынке товаров и услуг за определенный период. Это похоже на концепции инфляции и дефляции, за исключением того, что эскалация характерна для предмета или класса объектов, но часто не в основном обусловлена изменениями в денежной массе, и она, как правило, менее устойчива. В то время как эскалация включает в себя общую инфляцию, связанную с денежной массой, она также обусловлена изменениями в технологии, практикой и, в частности, дисбалансом спроса и предложения, характерными для товара или услуги в данной экономике. Чем больше эскалации, тем меньше будет ЧПС в нашем случае, потому что эта эскалация имеет положительный знак и имеет значение расхода для CF.

Годовое потребление энергии для с. Токма составляет 195,1 МВт·ч. При наличии старого оборудования стоимость 1 кВт·ч составила 44,87 руб. Основываясь на интеграции ФЭС, с учетом инвестиционных затрат и ожидаемой

продолжительности жизни проекта, равной двадцати годам, стоимость потерь топлива, транспорта и передачи уменьшается примерно на 8%. Этот результат также помогает оценить ежегодные субсидии, необходимые для предоставления электроэнергии для потребителей по цене тарифа. Правительство заплатит эту сумму, но эта сумма будет уменьшаться ежегодным снижением цены на солнечные батареи. Исходя из этого преимущества, этот проект получит высокую возможность привлечь администрацию региона в качестве инвестора.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ6Е	Муравьев Дмитрий Игоревич

Школа	ИШЭ	Отделение	ОЭЭ
Уровень образования	магистр	Направление	13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования и области его применения	<i>Объектом исследования является пакет программ для проектирования в который входят MS Office.</i>
-----------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Производственная безопасность	<ul style="list-style-type: none"> - Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды. - Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды.
2. Экологическая безопасность	<ul style="list-style-type: none"> - Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду. - Анализ «жизненного цикла» объекта исследования. - Обоснование мероприятий по защите окружающей среды.
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	<ul style="list-style-type: none"> - Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований. - Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС.
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	<ul style="list-style-type: none"> - Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства. - Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Амелькович Юлия Александровна	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Е	Муравьев Дмитрий Игоревич		

5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Данная глава включает в себя комплекс мер и мероприятий по обеспечению безопасных условий жизни для людей, живущих вблизи фотоэлектрической станции. Представлена оценка влияния проекта на окружающую среду, разработаны организационные меры обеспечения безопасности установки и меры безопасности в чрезвычайных ситуациях. Произведен анализ влияния вредных и опасных факторов на дежурного электрика в условиях работы фотоэлектрической станции, отображены меры по снижению их влияния. Проанализированы законодательные и нормативные документы, затрагивающие данный проект.

5.1 Производственная безопасность

5.1.1. Вредные проявления факторов производственной среды

В данном проекте рассматривается ФЭС, расположенная на некотором расстоянии от с. Токма. Для данной территории характерен резкий умеренно континентальный климат. Зимой средняя температура воздуха составляет -20°C , многоснежная. Лето, как правило, дождливое и теплое, средняя температура воздуха составляет $+15,4^{\circ}\text{C}$. Опасные природные катаклизмы в данной местности Иркутской области, такие как: наводнения и лесные пожары происходят с ежегодной частотой. Индексы вредных веществ в атмосфере для данного поселения определить достаточно затруднительно, но основными источниками являются ДЭС, автомобильные, лодочные и воздушные средства передвижения. В состав загрязнений входят следующие вещества: диоксид азота (NO_2), углекислый газ (CO_2), гидрокарбонаты (C_xH_y), сажа (С), диоксид серы (SO_2) и др.

В силу того, что ФЭС находится в сельской местности, где нет никаких крупномасштабных производственных помещений, станций и других заводов, которые могли бы повлиять на окружающую среду в поселении, то уровень

загрязнений значительно ниже. Опасные факторы, угрожающие условиям жизни человека в данных кондициях, отсутствуют. В с. Токма существует лишь две улицы, вблизи домов не проходят высоковольтные линии электропередач, которые могли бы вызвать сильные электромагнитные поля. Однако, есть необходимость удостовериться в безопасности магнитных полей, вызываемых солнечными панелями.

Основное рабочее место дежурного электрика располагается в производственном помещении ФЭС. Основная работа производится с использованием персонального компьютера (ПК). При работе с ПК возможны следующие вредные факторы: повышенный уровень шума, изменения температуры, нехватка естественного освещения и возможность поражения статическим электричеством.

Условия труда дежурного электрика определяются следующими характеристиками:

1. Расположением основных элементов рабочего места, которые должны иметь эргономичное расположение и соответствовать анатомо-физиологическим данным работающего человека.
2. Условием окружающей среды, микроклиматом: освещение, шум, вибрации, вентиляция, температурный режим.
3. Характеристиками информационного взаимодействия человека и ПК, ввод и вывод информации.

Микроклиматические параметры, такие как температура, относительная влажность и скорости движения воздуха в помещении, напрямую влияют на работоспособность человека. Для обеспечения оптимальных условий труда санитарные нормы СанПиН 2.2.4.548-96 определяют на одного работающего человека объём производственного помещения не менее 20 м³ площади помещения, огороженного стенами не менее 6 м².

С целью создания нормативных условий для персонала, установлены нормы производственного микроклимата ГОСТ 12.1.005-88 «Воздух рабочей зоны. Общие санитарно-гигиенические требования», а также СанПиН 2.2.4.584-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений». В Таблице 11 приведены оптимальные нормы параметров микроклимата, а в Таблице 12 допустимые нормы.

Таблица 11 – Оптимальные нормы параметров микроклимата в рабочей зоне производственных помещений

Время года	Категория работы	Температура воздуха, °С	Относительная влажность, %	Средняя скорость движения воздуха, не более 2 м/с
Зима	Легкая, 1-я	22–24	40–60	0,2
Лето	Легкая, 1-я	23–25	40–60	0,2

Согласно Таблице 11, для поддержания оптимального уровня условий работы в производственном помещении на ФЭС, должна быть предусмотрена и спроектирована системы отопления и вентиляции. Для обеспечения данных требований необходимо провести анализ условий труда в с. Токма.

Таблица 12 – Допустимые нормы параметров микроклимата в рабочей зоне производственных помещений

Время года	Категория работы	Температура воздуха, °С, для постоянных рабочих мест	Относительная влажность, %, не более	Средняя скорость движения воздуха, не более
Зима	Легкая, 1-я	20–25	75	0,1
Лето	Легкая, 1-я	22–28	55 при 28 °С	0,1–0,2

Требуемое состояние микроклимата рабочей зоны может быть обеспечено при использовании таких технических средств, как:

1. Теплоизоляция источников тепловых излучений, с целью предотвращения нагревания воздуха в помещении и тепловой защиты персонала;

2. Устройств вентиляции и отопления СНиП 41-01-2003 «Отопление, вентиляция и кондиционирование».

Задача вентиляции – поддержание и обеспечение чистоты воздуха в производственном помещении. Вентилирование помещения достигается с помощью нагнетания свежего и отводом загрязненного или нагретого воздуха. Целью отопления помещения является поддержание в них в холодное время года заданной температуры воздуха, а также обеспечить безопасность в отношении пожаров и взрывов.

Электромагнитное и ионизирующее излучение представляют серьёзную угрозу здоровью человека, в случае превышения предельно допустимых норм. Нормирование постоянных магнитных полей производится по СНиП 1748-72. Напряженность рабочего места при работе магнитных устройств не должна превышать 8 кА/м. Согласно ГОСТ 12.1.002-75 «Электрические поля промышленной частоты» облучение электрическим полем регламентируется как по величине напряженности, так и по продолжительности действия.

Таблица 13 – Допустимые уровни напряжённости электрического поля и продолжительности пребывания работающих без средств защиты

Напряженность электрического поля, кВ/м	Допустимая продолжительность пребывания человека в течение суток в электрическом поле, мин.
Менее 5	Без ограничений
5–10	Не более 180
10–15	Не более 90
15–20	Не более 10
20–25	Не более 5

Ослабление мощности электромагнитного поля на рабочем месте, в частности в производственном помещении, достигается путём увеличения расстояния между источником излучения и рабочим местом, установкой

отражающих или поглощающих экранов между источником и рабочим местом, размещение токоведущих элементов аппаратов и устройств в ферромагнитные оболочки кожухи. Самым эффективным методом является установка экранирующих экранов. Экраны могут защищать как сам источник, так и рабочее место, также применяют заземляющие экраны.

Низкая освещённость рабочего места препятствует длительной работе, вызывая утомление и способствуя развитию близорукости у работающего персонала. Слишком низкие уровни освещённости способны вызывать апатию и сонливость, в совокупности с другими факторами способны вызвать чувство тревоги. Длительное пребывание в таких условиях вызывает снижение интенсивности обмена веществ в организме и его общее ослабление. Подобные симптомы наблюдаются и при работе в помещениях с ограниченным спектральным составом света. Слишком яркий свет ослепляет, понижает зрительную функцию, вызывает перевозбуждение нервной системы, снижает работоспособность. Воздействие чрезмерной яркости может вызывать фотоожоги глаз и кожи, кератиты, катаракты и другие нарушения.

Нормирование естественного освещения осуществляется согласно СНиП 23-05-95. Произведём расчёт освещения рабочего помещения дежурного электрика. Размеры помещения – 13х5х2 м, характер помещения – малое количество пыли, помещение без повышенной опасности. Для производственного помещения будет применяться система комбинированного освещения с использованием светильников СДС 22-04-Д1-100-2000-УХЛ. Высота помещения составляет два метра, что позволяет использовать выбранный светильник.

Расчёт размеров: $H = 5$ м, $L_A = 13$ м, $L_B = 5$ м, $h_p = 0,8$ м. Расстояние между светильниками и перекрытием: $h_c = 0,5$ м, высота светильника над полом: $h_n = H - h_c = 5 - 0,5 = 4,5$ м. Высота светильника над рабочей поверхностью: $h = h_n - h_p = 4,5 - 0,8 = 3,7$ м, принимаем $\lambda = 2$, найдём расстояние между соседними светильниками $L = h \cdot \lambda = 3,7 \cdot 2 \approx 7$ м. Оптимальное расстояние от крайнего ряда светильников до стены: $l = L/3 = 7/3 \approx 2$ м. Светильники размещаем в два ряда, в

каждом из них установим 6 светильников, расстояние между ними будет составлять 0,7 м. Мощность осветительной системы принимается равной 240 Вт. Расчёт общего равномерного освещения, где световой поток в каждом ряду определяется по следующему выражению:

$$\Phi = E_H \cdot S \cdot K_3 \cdot \frac{Z}{n} \cdot \eta = 500 \cdot 65 \cdot 1,1 \cdot \frac{1}{12} \cdot 1 = 2979 \text{ Лм}, \quad (24)$$

где E_H – минимальный уровень освещённости по СНиП 23-05-95, [Лк]; S – площадь освещаемого помещения, [м²]; K_3 – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника; Z – коэффициент неравномерности освещения, для светодиодных ламп при расчётах берётся равным 1; n – число светильников; η – коэффициент использования светового потока.

Шум – это совокупность звуков различной интенсивности и частоты, возникающих при механических колебаниях газообразных, твердых и жидких сред. Оказывает сильное влияние на организм работающего человека, его нервную и сердечно-сосудистую системы. Длительное воздействие шума снижает остроту зрения и слуха, вызывает повышение кровяного давления, утомление центральной нервной системы. У людей, работающих в шумном помещении, увеличивается количество ошибок в процессе работы, снижается производительность труда. Воздействие шума способно привести к появлению профессиональных заболеваний и может явиться также причиной несчастного случая. Источником шума на предприятии являются машины, оборудование и различные виды ручного инструмента. Значения предельно допустимых уровней шума нормируются ГОСТ 12.1003-83 и СН 2.2.4/2.1.8.562-96.

Снижения шума достигают с помощью: уменьшения в источнике, изменение направленности излучения, планировки помещения, звукоизоляции, уменьшения шума на пути его распространения. В случае невозможности уменьшить шум, применяют средства индивидуальной защиты: вкладыши (снижение шума 5–20 дБ), наушники (воздействию шумов высокого уровня,

более 120 дБ), шлемы (используют, когда вкладыши и наушники не обеспечивают необходимой защиты).

5.1.2. Опасные проявления факторов производственной среды

Одним из возможных опасных факторов производственной среды, вызванный установкой ФЭС – электрический ток. Соответственно, все используемое оборудование должно быть правильно заземлено. Также стоит обратить внимание на установку солнечных панелей на землю. Необходимо удостовериться насколько надежна платформа или поверхность, на которой находится ФЭС, обезопасить жителей наличием укрепляющих конструкций.

Заземление солнечной системы должно быть отдельным от системы заземления у потребителя и тем более от провода заземления, приходящем от ДЭС. Обычно, для заземления солнечных панелей проектируют отдельную систему, заземление которой предусмотрено в виде специальных соединений на каркасе.

Максимальный постоянный ток от всех солнечных панелей можно найти следующим образом:

$$I_{\text{макс}} = \frac{P_{\text{макс}} \cdot n}{U_{\text{ном}} \cdot n_{\text{парал}}} = \frac{200 \cdot 156}{24 \cdot 78} = 16,6 \text{ А}, \quad (25)$$

где $P_{\text{макс}}$ – максимальная вырабатываемая мощность одной панели, [Вт], $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение солнечной панели, [В], n – количество солнечных панелей, $n_{\text{парал}}$ – количество солнечных панелей, соединенных параллельно (все панели соединены последовательно-параллельно, см. главу три).

Рекомендации по заземлению солнечных установок говорят, что необходимо соединять медным проводом 6 мм² в сечении или более. Выбираем ПуВ 6 (провод силовой установочный с однопроволочной медной жилой в ПВХ

изоляции, желто-зеленой расцветки). Для расчета количества заземляющих электродов, воспользуемся формулой из ПУЭ:

$$N_B = \frac{0,366 \cdot k_c \cdot p}{l \cdot M_B \cdot R_3} \cdot \left(\lg \frac{2 \cdot l}{d} + \frac{1}{2} \cdot \lg \frac{4 \cdot t' + l}{4 \cdot t' - l} \right), \quad (26)$$

где p – приближенные значения удельных сопротивлений грунтов и воды, [Ом·м]; k_c – признаки климатических зон и значения коэффициента; l – длина вертикального заземлителя, [м]; d – диаметр вертикального заземлителя, [м]; t' – длина от поверхности земли до середины вертикального заземлителя, [м]; M_B – коэффициент использования вертикальных заземлителей, зависящий от количества заземлителей и расстояний между ними. Предварительное количество вертикальных заземлителей для определения M_B можно принять равным как $M_B = r_B / R_3$; a – расстояние между вертикальными заземлителями (обычно, отношение расстояния между вертикальными заземлителями к их длине принимают равным $a/l = 1; 2; 3$); R_3 – допустимые сопротивления заземляющего устройства в электроустановках до и выше 1000 В, при этом $l > d$, $t_0 > 0,5$ м.

Около с. Токма преимущественно черноземные почвы, следовательно, удельное сопротивление $p = 20$ Ом·м. Коэффициент k_c принимаем для второй климатической зоны – 1,5. Отношение расстояния между электродами к длине: $a/l = 1$, тогда примерочное число электродов выбираем 2 и $M_B = 0,87$ длиной $l = 4$ м и диаметром 0,01 м, $t_0 = 0,5$ м и $t' = 0,5 + 2 = 2,5$ м. Допустимое сопротивление заземляющего устройства в электроустановках $R_3 = 4$ Ом, тогда:

$$N_B = \frac{0,366 \cdot 1,5 \cdot 20}{0,87 \cdot 4} \cdot \left(\lg \frac{2 \cdot 4}{0,01} + \frac{1}{2} \cdot \lg \frac{4 \cdot 2,5 + 4}{4 \cdot 2,5 - 4} \right) = 5,6. \quad (27)$$

Так как $N_B < 10$, то для ФЭС можно принимать шесть электродов.

Также должна быть выполнена молниезащита станции. Для этого нужно сделать анализ исходного состояния станции, условий и типа грунта. Средствами

защиты в таком случае являются молниеприемники, установленные на самых высоких точках территории станции и заземлители диаметром от 6–10 мм, которые соединены с электродами длиной 2–3 м и диаметром от 10 мм, уложенных на глубине не менее 0,5 м.

Что касается статического заряда, то он накапливается на теле человека вследствие явления электризации. Он не опасен для человека, но может вывести из строя компоненты компьютерной техники.

При работе с компьютерной техникой, в целях защиты его от статического электричества, необходимо: правильно выполнить заземляющее устройство, держать влажность на требуемом уровне, использовать антистатические коврики под рабочим местом и использовать антистатический браслет.

5.2 Экологическая безопасность

5.2.1. Анализ выявления объекта исследования на окружающую среду

Установка ФЭС, сама по себе, включающая в себя солнечные панели, провода, инвертор, аккумуляторные батареи и двусторонний счетчик, никаких вредных факторов воздействия на окружающую среду не выявляет и не производит. Это оборудование, как показывают исследования, наносит минимальный ущерб окружающей среде. Электричество, генерируемое с помощью солнечной установки, не производит вредного воздействия ни на воздушные массы, ни на подземные воды, не истощает природные ресурсы и не несет опасности как для обитателей животного мира, так и для человека. Для производства электроэнергии из данного типа ВИЭ не требуется топливо, что освобождает нас от его транспортировки и переработки.

Негативное воздействие на окружающую природную среду может вызываться при производстве и утилизации солнечных панелей. Производство солнечных панелей требует использование достаточно большого количества вредных материалов, большинство из которых используется для чистки

полупроводниковых материалов. Такими химическими веществами являются: соляная кислота, серная кислота, азотная кислота, фтористый водород, ацетон и т.д. Безусловно, количество и число химических веществ варьируется в зависимости от типа солнечных панелей и степени необходимости очистки. Весь процесс производства солнечных панелей должен контролироваться внимательно, иначе, при возникновении неполадок или неправильном хранении, это может вызвать огромный ущерб окружающей среде и людям.

Солнечные панели не выделяют диоксид углерода при генерации электричества, однако можно оценить вклад загрязнения при производстве, транспортировке, переработке и утилизации. Таким образом, выработка 1 кВт·ч солнечными панелями вызывает выработку 0,03–0,08 кг эквивалентного CO₂, для примера, сжигание природного газа и угля вырабатывает 0,27–0,9 и 0,63–1,62 кг эквивалентного CO₂ соответственно.

5.2.2. Обоснование мероприятий по защите окружающей среды

Производство энергии путем сжигания ископаемого топлива приводит к загрязнению многими опасными химическими компонентами. Действительно, все средства генерации энергии, включая ФЭС, создают загрязняющие вещества, когда учитывается весь их жизненный цикл. Выбросы жизненного цикла обусловлены использованием энергии на основе ископаемого топлива для производства материалов для солнечных элементов, модулей и систем, а также непосредственно из производства плавки и производственных мощностей.

В этом случае выбросы, связанные с Токмой, могут быть получены из стандартного удельного расхода дизельного топлива, необходимого для отдельных видов деятельности. Использовались российские стандартные значения потребления дизельного топлива [85]. Этот стандарт указывает удельные выбросы на одну тонну потребляемого дизельного топлива от ДЭС.

Валовая эмиссия i -компонента за год стационарной дизельной установкой определяется по формуле:

$$W_{загр} = \frac{1}{1000} \cdot q_{загр} \cdot G_{tot}, \quad (28)$$

где $q_{загр}$ – выброс i -компонента на один килограмм дизельного топлива, когда работает стационарный дизельный агрегат, с учетом набора режимов; G_{tot} – расход топлива в год на ДЭС. Сокращение по каждому компоненту выбросов приводится в следующей таблице:

Таблица 14 – Результаты смягчения последствий загрязнения путем интеграции фотоэлектрической станции

Загрязняющее вещество	Уровень снижения, кг
Углекислый газ (CO ₂)	363,9
Диоксид азота (NO _x)	414,5
Гидрокарбонаты (C _x H _y)	190,1
Диоксид серы (SO ₂)	46,5
Сажа (C)	37,9

Согласно Таблице 14, необходимо отметить, что результаты смягчения загрязнений в экологически защищенном регионе вполне приемлемы. Интеграция ФЭС в АСЭС вызывает сокращение выбросов в атмосферу каждый год приблизительно на 3,8%. В дополнение к приведенной выше информации мы должны учесть прямые и косвенные выбросы. Интеграция ВИЭ в АСЭС вызывает не только непосредственное влияние на сокращение выбросов в соответствии с Таблицей 14, но и имеется косвенный эффект от сокращения добычи полезных ископаемых, снижаются расходы на топливо, транспортные расходы, железнодорожные перевозки или другие подходы к доставке и передаче топлива [86]. Экологические налоги были рассчитаны на основе российского законодательства для дизельных электростанций, где цена конкретной составляющей эмиссии была принята за тонну потребления топлива.

Интеграция ФЭС в АСЭС не влияет на снижение экологического налога в экономической модели. Этот случай имеет только один положительный эффект

– снижение количества выбросов из системы ДЭС. Этот результат имеет четкое значение, поскольку налог должен взиматься за одну тонну выбросов, а уменьшение выбросов с помощью ФЭС недостаточно для освобождения от выплаты налога. Все эти упоминания были использованы в экономической модели.

5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

5.3.1. Анализ вероятных чрезвычайных ситуаций

Установка ФЭС не может вызвать чрезвычайных ситуаций. Однако, она может ухудшить условия устранения или спасения жизни человека при возникновении каких-либо природных катаклизмов. Чрезвычайными ситуациями (ЧС) называются ситуации, сложившиеся в результате аварии, бедствия, которые влекут за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или производственной среде, значительные материальные ущербы и нарушения условий жизнедеятельности людей. В Иркутской области, потенциально, могут возникнуть ЧС различного характера: техногенного (пожар, взрыв, обрушение здания, аварии на коммунальных системах); природного (землетрясение, наводнение, лесные пожары); социального (инфекционные заболевания, массовые беспорядки); экологического (резкое изменение климата) или военного (разрушение инфраструктуры, гибель людей).

Для с. Токма характерны два вида природных ЧС, которые возникают с ежегодной частотой: наводнения и лесные пожары. Данные получены на основании анализа средств массовой информации (СМИ) за последние семь лет. Стоит отметить также самый распространенный техногенный вид ЧС – пожар по причине технических и человеческих факторов. Причинами пожара по техническим факторам могут выступать перегрев электрооборудования, неисправность защитных устройств, плохие контакты в соединениях, неисправные провода. Пожар по причине человеческого фактора вызывается

путем использования открытого огня без соблюдения норм техники безопасности, ошибка при настройках параметров системы.

Для ликвидации возникновений подобного рода ЧС, необходимо предоставить обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработать порядок-алгоритм действий в случае возникновения ЧС.

5.3.2. Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС

Нормами пожарной безопасности НПБ 105-03 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности» установлены следующие категории помещений: «А» (взрывопожароопасная), «Б» (взрывопожароопасная), «В1» – «В4» (пожароопасные), «Г» и «Д». К категориям «А» и «Б» относятся помещения, в которых при воспламенении находящихся там веществ может развиваться избыточное давление 5 кПа. В помещениях категорий «В1» – «В4» возможно только горение горючих и трудно горючих веществ. Помещения категории «Г» характеризуются наличием горячих материалов. В помещениях категории «Д» обрабатываются вещества и материалы в холодном состоянии.

Рассматриваемое рабочее помещение относится к категории «В1», в соответствии со СНиП 11-2-80.

Мероприятия противопожарной профилактики:

1. Хранение горюче-смазочных материалов в обособленных помещениях, оборудованных несгораемыми шкафами и стеллажами.
2. Оборудование системы вентиляции устройствами отключения при пожаре.
3. Наличие пожарной сигнализации.

Во избежание распространения огня во время пожара с одной территории на другую, используются различные пожарные преграды, такие как: стены, двери, окна, перегородки. В коридорах, на лестничных площадках и у входов,

должны быть установлены пожарные краны. В помещении должны быть первичные средства пожаротушения. При возгорании или возникновении пожара следует немедленно начать эвакуацию людей, отключить подачу воздуха по системе вентиляции, обесточить помещение.

В соответствии с нормами СНиП 2.01.02-85 для ликвидации пожаров на их начальной стадии, должны применяться первичные средства пожаротушения: пожарные краны; химические пенные огнетушители типа (ОХП-10), (ОХВП-10), углекислотные огнетушители (ручные ОУ-2, ОУ-5, ОУ-8; передвижные-ОУ-25, ОУ-80), порошковые огнетушители типа ОП-5-01. Для рабочего помещения целесообразно применение ручных углекислотных огнетушителей типа ОУ-2, ОУ-5, ОУ-8.

Во время событий наводнений не нужно пытаться отключить фотоэлектрическую систему, если какой-либо из компонентов покрыт водой или если части системы все еще влажные. Это может привести к смертельному поражению электрическим током. Не приближайтесь к системе, если части погружены в воду, и, если солнечные панели размещены на крыше, чтобы избежать затопления оборудования, необходимо остерегаться электропроводки. В случае, если вы считаете, что ваша система безопасна и автоматически отключено питание – помните, что системы ФЭС все еще создают напряжение постоянного тока, когда есть дневной свет. Для этого случая рекомендуется полностью закрыть панель для обеспечения безопасности.

После ухода паводковых вод не пытайтесь использовать какие-либо переключатели, поскольку остаточная влажность может привести к тому, что фотоэлектрические системы могут оставаться под напряжением. Вы можете потенциально подвергнуться серьезному или смертельному поражению электрическим током, даже если сеть подверглась возмущению. В данной ситуации необходимо связаться с аккредитованной сервисной службой для восстановления системы. Убедитесь, что инвертор фотоэлектрической системы заменен, если он погружен или частично погружен в воду. Не подключайте

фотоэлектрические системы до тех пор, пока лицензионный подрядчик не подтвердит, что установка безопасна.

5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Текущее техническое обслуживание ФЭС должно проходить в соответствии всех норм безопасности и желательно с помощью специализированного персонала (замена и ремонт оборудования, защитных устройств). В связи с этим должны выполняться следующие требования:

1. Оборудование должно быть прочно закреплено в специальных шкафах или других местах, предполагающих их перманентную фиксацию.

2. Проход и доступ к оборудованию должен быть свободным.

Для расчета, урегулирования и установки солнечных панелей следует следовать указаниям и правилам следующих документов:

1. СНиП номер 2.08.02-89: «Общественные здания и сооружения».

2. СанПиН 2.2.4.1191-03: «Электромагнитные поля в производственных условиях».

3. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03: «Электромагнитные поля в производственных условиях. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы».

4. СНиП 3.05.06-85: «Электротехнические устройства».

5. ПУЭ.

6. НПБ 105-03 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности».

7. ГОСТ 12.1003-83 и СН 2.2.4/2.1.8.562-96.

8. ГОСТ 12.1.005-88: «Воздух рабочей зоны. Общие санитарно-гигиенические требования».

9. СанПиН 2.2.4.584-96: «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема энергоснабжения для децентрализованных потребителей – нелинейная и многокритериальная функция, особенно для АСЭС. Существуют не только технические, но и экономические, социальные и экологические ограничения. Эта работа объединяет эти функции и включает в себя углубленный технический анализ с обширной и соответствующей экономической оценкой. Согласно Энергетической стратегии России, на период до 2035 года [8], мы сравниваем все возможные варианты поставки электроэнергии в сельское поселение Токма.

В первой главе мы предлагаем общее описание значения РГ, обзор литературы, относящийся к РГ, а также международный опыт на примерах Германии, США, Китая и Чехии. Кроме того, мы объясняем состояние РГ в России. Совокупные результаты этой части имеют интересное описание. На основе уровня законодательства в странах, которые были представлены выше, все они имеют связь между правительством и владельцами ВИЭ. Программы надежных стимулов государственной поддержки в сочетании с относительно высокими тенденциями розничной торговли, прогрессивными и адаптируемыми технологиями для производства ВИЭ привели США и Германию к лидирующим позициям в отношении установленной мощности распределенной фотоэлектрической генерации. Этот рост, а также развитие накопительных аккумуляторов, рост рынка электромобилей и других технологий распределенной энергии также привели к нескольким успешным действиям правительства, которые спровоцировали ряд предложений и реализации проектов ВИЭ.

В России, несмотря на растущие темпы строительства объектов РГ, процесс сосредоточения сил правительства не находит ясного места в долгосрочном планировании системы электроснабжения. По-прежнему нет понимания того вклада, который может внести РГ в совершенствование системы и ее модернизации, также не разработана государственная политика по этому

вопросу. Таким образом, одна из возможных областей для повышения эффективности использования и сокращения потребления энергии от ДЭС, а также потерь при передаче из децентрализованных регионов – распределенная система фотоэлектрических станций.

Во второй и третьей главах мы представляем структуру гибридной автономной энергосистемы в MatLab и технико-экономический анализ. В данных главах мы приводим общее описание оборудования, которое использовалось для моделирования переходных процессов. Результаты моделирования включают в себя случаи единой ФЭС и распределенное монтажное исполнение конструкции. Также обсуждались проблемы с качеством электроэнергии и потерями электроэнергии в сельских сетях России. Эти результаты сравниваются с случаем АСЭС без ВИЭ.

Когда ДЭС используется без ФЭС, мы обнаруживаем, что уровень напряжения в конце линии передачи уменьшается на 6% и 5% в зимнее и летнее время соответственно. Дополнительный источник питания в виде ФЭС помогает перераспределять электроэнергию между ДЭС и ФЭС. Основываясь на влиянии ФЭС, мы предлагаем изменить текущее значение напряжения на различных участках линии передачи. Эта интеграция уменьшает потери мощности в проводниках и обеспечивает большую стабильность напряжения в точках подключения потребителей электроэнергии. Результаты показывают, что использование мощности от единой ФЭС с аккумуляторными батареями на уровне половины номинальной нагрузки системы, уменьшит падение напряжения в конце линии на 4–10%. Это достигается путем подключения ФЭС на расстоянии от ДЭС, которое составляет не менее половины общей длины линии электропередачи. Эффективность использования ФЭС в автономных энергосистемах без систем хранения энергии существенно ограничена условиями работы сетевых инверторов. Чтобы стабилизировать напряжение в энергосистеме и уменьшить потери электроэнергии, рекомендуется использовать ФЭС с системами хранения энергии и подключать их ближе к концу линии распределения или к точке подключения крупнейшего потребителя.

Необходимо сказать, что было бы интересно провести более углубленное исследование и, следовательно, привлечь финансирование для этой цели. Тем не менее, мы обсудили возможные варианты долгосрочных изменений в состоянии электроснабжения с. Токма.

В четвертой главе мы представляем экономическую модель, отражающую все аспекты интеграции возобновляемых источников. Модель включает в себя расчет сэкономленных затрат на потребление топлива и затраты на распределение потерь. Рассмотрены оценки инвестиций проекта, издержек производства, подхода ЧПС.

Годовое потребление энергии в деревне Токма составляет 195,1 МВт·ч. Результаты расчетов, основанные на моделировании потребления дизельного топлива, показывают, что ожидаемый объем экономии топлива составляет около 27%, а снижение потерь – около 25% в год. Принимая во внимание стоимость одного кВт·ч дизельного топлива как 16,21 руб., а тариф на выработку электроэнергии от ДЭС в с. Токма – 44,87 руб./кВт·ч [84], общая сумма экономии топлива и снижение потерь при передаче в год составит 19 485,93 руб. На основе интеграции ФЭС с учетом инвестиционных затрат и ожидаемой продолжительности жизни проекта, равной двадцати годам, стоимость потерь топлива, транспорта и передачи снизилась примерно на 8% по окончательному тарифу 41,11 руб./кВт·ч. Все эти данные были получены с помощью известных финансовых инструментов, таких как темпы роста эскалации и деэскалации, уровень инфляции, а также использование дисконтированного периода окупаемости.

В пятой главе рассмотрены вопросы социальной ответственности при реализации процесса по производству электроэнергии. Для обеспечения безопасности были выявлены опасные и вредные факторы производства. Установка фотоэлектрической станции не вызывает никаких вредных факторов. Опасными факторами являются воздействие электрического тока, электромагнитного поля, а также неустойчивость конструкции. Предложены

меры по приведению данных факторов к значениям, соответствующих нормативным документам.

Стоит отметить, что было оценено влияние производственного процесса на окружающую среду. Данный процесс направлен на уменьшение выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. Интеграция ФЭС в АСЭС вызывает сокращение выбросов каждый год приблизительно на 3,8%. Интеграция ФЭС в АСЭС не влияет на снижение экологического налога в экономической модели. Этот случай имеет только один положительный эффект – снижение доли выбросов из системы ДЭС. Однако, процесс уменьшения загрязнений вредными химическими элементами может быть нарушен при плохом контроле производства и утилизации возобновляемой установки.

При организации мер по обеспечению безопасности были описаны инструкции и алгоритмы по действиям и нормам поведения дежурного электрика и жителей поселения. Для предотвращения пожаров и последствий наводнений разработан план необходимых действий, проработаны нормативно-правовые документы.

Наша методология может быть применена к другим проектам в Иркутской области. Несмотря на то, что исследования в этой области обширны, эта работа является одним из нескольких примеров полной оценки проблем энергоснабжения Сибири. Предлагаемый гибрид для энергоснабжения в с. Токма показывает хорошие технические характеристики (потребление топлива, использование накопителей) и экономические (ЧПС, ВНД) результаты. Потенциальными преимуществами использования гибридной системы электропитания могут быть эффективное использование устройства хранения энергии, интеграции ФЭС и его конфигурации в АСЭС, которые полезны для децентрализованных областей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Лукутин Б.В., Муравлев И.О., Плотников И.А. *Децентрализованные системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями: учебное пособие* / Б.В. Лукутин, И.О. Муравлев, И.А. Плотников – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 100 с.
- [2] Wood J. *Local Energy: Distributed generation of heat and power*. London: The Institution of Engineering and Technology, 2008.
- [3] Удалов С.Н. *Возобновляемые источники энергии: учебное пособие* / С.Н. Удалов – 3-е изд., перераб. доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – 459 с.
- [4] Evans L.R. *Fueling Our Future: An Introduction to Sustainable Energy*. New York: The United States of America by Cambridge University Press, 2007.
- [5] Dugan R.C., McGranaghan M.F., Santoso S., Beaty H.W. *Electrical Power Systems Quality*. Digital Engineering Library: The McGraw-Hill Companies, 2004.
- [6] Nystén-Haarala S. *The changing governance of renewable natural resources in northwest Russia*. Farnham: Ashgate Publishing Limited, 2008.
- [7] Елистратов В.В. *Автономное энергоснабжение*: [Электронный ресурс]. Режим доступа: [//postnauka.ru/video/62744](http://postnauka.ru/video/62744) [Дата обращения: 08.08.2018].
- [8] Энергетическая стратегия России на период до 2035 года. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.energystrategy.ru/ab_ins/source/ES-2035_09_2015.pdf [Дата обращения: 08.08.2018].
- [9] Лыкин А.В. *Электрические системы и сети: учебное пособие* / А.В. Лыкин – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 248 с.
- [10] ГОСТ Р 54531–2011. *Альтернативные технологии. Возобновляемые и альтернативные энергетические ресурсы. Термины и определения*. – М.: Стандартинформ, 2013. Режим доступа: <http://gostexpert.ru/data/files/54531-2011/70239.pdf> [Дата обращения: 08.08.2018]

[11] Localized power generation: S&P Global Platts [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.platts.com/newsfeature/2013/electricpower/powergen/local> [Дата обращения: 08.08.2018]

[12] Total energy consumption: Enerdata. Global Energy Statistical Yearbook 2017 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html> [Дата обращения: 08.08.2018]

[13] Standard for Interconnecting Distributed Resources IEEE 1547. New York, the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Publishing, 2003. Режим доступа: http://grouper.ieee.org/groups/scc21/1547/1547_index.html [Дата обращения: 08.08.2018]

[14] Ran Fu, Feldman D., Margolis R., Woodhouse M., Ardani K. U.S. *Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2017*. National Renewable Energy Laboratory (NREL) Prepared under Task No SETP.10308.03.01.10, 2017. Technical report. Режим доступа: <https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/68925.pdf> [Дата обращения: 08.08.2018]

[15] Cintuglu M.H., Altamirano A, Mohammed O.A. *Modeling of PV Based Distributed Generator Systems with Diverse Load Patterns*. The 12th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology. Miami, 2014.

[16] Amaresh K., Sankar V. *Modeling of Photovoltaic System Interconnected with Radial Distribution System using MATLAB/SIMULINK*. In International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT) 3/2013. Режим доступа: http://www.ijeit.com/Vol%203/Issue%203/IJEIT1412201309_39.pdf [Дата обращения: 08.08.2018]

[17] Krismadiata, Narsudin A.R., Ping H.W., Selvaraj J. *Photovoltaic module modeling using simulink/matlab*. The 3rd International Conference on Sustainable Future for Human Security SUSTAIN 2012. Malaya, 2012. [Дата обращения: 08.08.2018]

[18] Rodriguez J.R., Ruiz F., Biel D., Guinjoan F. *Simulation and analysis of distributed PV generation in a LV network using MATLAB-Simulink*. Circuits and

Systems (ISCAS), Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on. Paris, 2010. [Дата обращения: 08.08.2018]

[19] 1.3 Billion are living in the dark: The Washington Post [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.washingtonpost.com/graphics/world/world-without-power/> [Дата обращения: 08.08.2018]

[20] Lukutin B.V., Shandarova E.B., Makarova, A.F, Shartsman, I.B. *Effect of Distributed Photovoltaic Generation on the Voltage Magnitude in a Self-Contained Power Supply System*. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. Tomsk, 2016. Режим доступа: <http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/34882/1/dx.doi.org-10.1088-1757-899X-127-1-012005.pdf> [Дата обращения: 08.08.2018]

[21] Germany: CIGRE [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.cigre.org/var/cigre/storage/original/application/85930102220abc8342ca5fe76c20adf2.pdf> [Дата обращения: 08.08.2018]

[22] Russia: CIGRE [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.cigre.org/var/cigre/storage/original/application/80d24e1a1b975edf91b1115f7246b569.pdf> [Дата обращения: 08.08.2018]

[23] Rajsky F., Donison M.P. *Comparison of transmission and distribution systems in the Czech Republic and Spain*. In RE&PQJ. Pilsen, 2013. Режим доступа: <http://www.icrepq.com/icrepq-08/339-rajsky.pdf> [Дата обращения: 08.08.2018]

[24] Connecting Possibilities: Scenarios for Optimizing Energy Systems [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.energy.siemens.com/ru/pool/hq/energy-topics/tradeshows/wec-2013/newsroom/Abstract-Siemens-Study-Connecting-Possibilities-EN.pdf> [Дата обращения: 08.08.2018]

[25] Electricity production: Enerdata [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://yearbook.enerdata.net/electricity/world-electricity-production-statistics.html> [Дата обращения: 08.08.2018]

[26] Энергоснабжение, 2012. Тенденции развития распределенной генерации [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=5371 [Дата обращения: 08.08.2018]

[27] Автоновости, 2011. Цены на солярку: полный абсурд и наглость. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://auto.mail.ru/article/34055-ceny_na_solyarku_polnyi_absurd_i_naglost/ [Дата обращения: 08.08.2018]

[28] Газета коммерсант, 2017. Дизель разогревает цены: дизель дорожает из-за ремонтов НПЗ. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/3408522> [Дата обращения: 08.08.2018]

[29] Солнечная энергетика. Аналитика, 2011. Солнечная энергетика: перспективы в мире и состояние в России. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.energy-fresh.ru/solarenergy/analitics/?id=1931> [Дата обращения: 08.08.2018]

[30] Вопросик, 2016. Перспективы Северного Морского Пути. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://voprosik.net/perspektivy-severnogo-morskogo-puti/> [Дата обращения: 08.08.2018]

[31] Елистратов В.В., Конишев М.А. *Возобновляемая энергетика: пути повышения энергетической и экономической эффективности*. – Москва, 2013. Режим доступа: <http://www.reenfor.org/upload/files/2fd4e95799ef5e6166f9baebdee399a5.pdf> [Дата обращения: 08.08.2018]

[32] Николаев Н.Г. [Докторская диссертация]. *Ресурсное и технико-экономическое обоснование широкомасштабного развития ветроэнергетики в России*. Москва, 2011. Режим доступа: <http://old.rgo.ru/wpcontent/uploads/2011/12/VEU-methodology.pdf> [Дата обращения: 08.08.2018]

[33] Рымаренко К.В. *Многофазная рашодеметрия*. Schlumberger, 2011. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16330251> [Дата обращения: 08.08.2018]

[34]: Иркутская область: Википедия, бесплатная энциклопедия [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Irkutsk_Oblast [Дата обращения: 08.08.2018]

[35] 1 миллион рублей в качестве помощи общине коренных малочисленных народов Севера “Токма” [Электронный ресурс]. Livejournal.

Режим доступа: <http://bg-irkutsk.livejournal.com/502978.html> [Дата обращения: 08.08.2018]

[36] Головщиков В.О, Рудаков О.А. *Возобновляемые источники энергии в Иркутской области: состояние, барьеры и перспективы их преодоления*. Вестник АНГТУ 10/2016. Ангарск: АНГТУ, 2016. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28296744> [Дата обращения: 08.08.2018]

[37] Новости Иркутской области и Забайкальского региона, 2010. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://i38.ru/pervaya-ekonomika/novuii-nefteskvazhinu-proburit-irkutskaya-neftyanaaya-kompaniya> [Дата обращения: 08.08.2018]

[38] Паспорт программы Непского муниципального образования, 2011. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://arhiv.admnepa.ru/sv_sovet_deputatov_npa_act.php?cs=11&id_position=1&id_npas=1&blok=sd&razdel=npa [Дата обращения: 08.08.2018]

[39] Пятков П.Ю. *Потери мощности и электроэнергии в электрических сетях*. Екатеринбург: УрГУПС, 2009.

[40] Мартынюк А.А. *Оценка возможности использования древесной биомассы для теплоснабжения в целях перехода от нефтепродуктов на местные возобновляемые виды топлива*. Лесной Вестник 5/2016. Москва: Production forces study Council. [Дата обращения: 08.08.2018]

[41] GIS Renewable energy sources of Russia [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://gisre.ru/> [Дата обращения: 08.08.2018]

[42] Новости сибирской науки, 2016. [Электронный ресурс]. *Энергетики и ученые помогут населенным пунктам Иркутской области*. Режим доступа: <http://www.sib-science.info/ru/institutes/dlya-tofalarii-22102016> [Дата обращения: 08.08.2018]

[43] Energy fresh, 2017. [Электронный ресурс]. В Иркутской области идет строительство солнечно-дизельной электростанции. Режим доступа: <http://energy-fresh.ru/news/?id=14642> [Дата обращения: 08.08.2018]

[44] Кожуховский И.С. *О проблемах развития малой распределенной энергетики России*. Москва: ENES форум, 2014. [Дата обращения: 08.08.2018]

[45] Lowder T., Zhou E., Tian T. *Evolving Distributed Generation Support Mechanisms: Case Studies from United States, Germany, United Kingdom, and Australia*. National Renewable Energy Laboratory (NREL) 2017. Technical report. Режим доступа: <https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/67613.pdf> [Дата обращения: 08.08.2018]

[46] Independent Statistics & Analysis, 2017. [Электронный ресурс]. *U.S. Energy Information Administration. Electric Power*. Режим доступа: https://www.eia.gov/electricity/monthly/epm_table_grapher.php?t=epmt_6_02_b [Дата обращения: 08.08.2018]

[47] Cohen M.A., Kauzmann P.A., Callaway D.S. *Economic Effect of Distributed PV Generation on California's Distribution System*. Energy Institute at Haas, 2015. Режим доступа: <https://ei.haas.berkeley.edu/research/papers/WP260.pdf> [Дата обращения: 08.08.2018]

[48] Hart D., Birson K. *Deployment of Solar Photovoltaic Generation Capacity in the United States*. Schar School of Policy and Government George Mason University, 2016. Режим доступа: <https://energy.gov/sites/prod/files/2017/01/f34/Deployment%20of%20Solar%20Photovoltaic%20Generation%20Capacity%20in%20the%20United%20States.pdf> [Дата обращения: 08.08.2018]

[49] The Washington Post, 2017. [Электронный ресурс]. *Mapping how the United States generates its electricity*. Режим доступа: https://www.washingtonpost.com/graphics/national/powerplants/?utm_term=.5a41d6c60a94 [Дата обращения: 08.08.2018]

[50] Wirth H. *Recent Facts about Photovoltaics in Germany*. Fraunhofer ISE, 2018. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/recent-facts-about-photovoltaics-in-germany.pdf> [Дата обращения: 08.08.2018]

[51] Fraunhofer ISE. *Net installed electricity generation capacity in Germany*. Режим доступа: https://www.energycharts.de/power_inst.htm?year=all&period=annual&type=power_inst [Дата обращения: 08.08.2018]

[52] Volkmar M. *High Penetration PV: Experiences in Germany and technical solutions*. SMA Solar Technology AG. Режим доступа: http://iearpvps.org/index.php?id=153&eID=dam_frontend_push&docID=1492 [Дата обращения: 08.08.2018]

[53] Bayer E. *Report on the German power system. 1.0. Study commissioned by Agora Energiewende, 2015*. Режим доступа: https://www.agoraenergiewende.de/fileadmin/downloads/publikationen/CountryProfiles/Agora_CP_Germany_web.pdf [Дата обращения: 08.08.2018]

[54] Сидорович В. *ВИЭ в Германии выработали 37,5% электроэнергии за три квартала*. RenEn, 2017. Режим доступа: <http://renen.ru/res-in-germany-generated-37-5-of-electricity-for-three-quarters-of-2017/> [Дата обращения: 08.08.2018]

[55] Ales R. *Electro-Energy Sector in Czech Republic: Present Situation, Opportunities and Threats*. 4Liberty.eu, Review no.2, 2015. Режим доступа: <http://4liberty.eu/electro-energy-sector-in-czech-republic-present-situation-opportunities-and-threats/> [Дата обращения: 08.08.2018]

[56] Li Y., Li R., Liu H., Cai H., Dong J. *China's Distributed Generation of Electric Power – Current Situation and Prospect. 2 North China Electric Power University, Beijing, 2016*. Режим доступа: <http://ijssst.info/Vol-17/No-23/paper16.pdf> [Дата обращения: 08.08.2018]

[57] Šúri M., Cebecauer T., Skoczek A., Fantik J. *Analysis of PV power generation in the Czech Electricity Transmission System ČEPS*. 26th European Photovoltaics Solar Energy Conference. Hamburg, Germany, 2011. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/266595054_ANALYSIS_OF_PV_POWER_GENERATION_IN_THE_CZECH_ELECTRICITY_TRANSMISSION_SYSTEM_CEPS [Дата обращения: 08.08.2018]

[58] Hofierka J., Kaóuk J., Gallay M. *The Spatial distribution of photovoltaic power plants in relation to solar resource potential: the case of the Czech Republic*

and Slovakia. Moravian Geographical Reports, 2013. Режим доступа: https://www.geonika.cz/EN/research/ENMGRClanky/2014_2_HOFIERKA.pdf [Дата обращения: 08.08.2018]

[59] Independent Statistics & Analysis, 2017. [Электронный ресурс]. *U.S. Energy Information Administration. Electric Power.* Режим доступа: <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/electricity.pdf> [Дата обращения: 08.08.2018]

[60] Yeung P., Dai A., Wu T. *Renewable Energy in China. Transiting to a Low-Carbon Economy.* Hong Kong: Asian Insights Office, DBS Research, 2016. [Дата обращения: 08.08.2018]

[61] SOLARGIS. [Электронный ресурс]. *Solar resource maps of China 2017.* Режим доступа: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/china> [Дата обращения: 08.08.2018]

[62] NRDC. [Электронный ресурс]. *China Climate & Energy Map 2017.* Режим доступа: <http://www.chinaenergymap.org/> [Дата обращения: 08.08.2018]

[63] Ip D., Chui S. *China Solar Sector. Initiation: a more powerful future for solar.* Daiwa Capital Markets, 2015. Режим доступа: http://asiaresearch.daiwacm.com/eg/cgi-bin/files/China_Solar_Sector_151029.pdf [Дата обращения: 08.08.2018]

[64] International Energy Agency (IEA). [Электронный ресурс]. *Prospects for Distributed Energy Systems in China.* France: IEA Publications, 2017. Режим доступа: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ProspectsforDistributedEnergySystemsinChina.pdf> [Дата обращения: 08.08.2018]

[65] Обухов С.Г., Плотников И.А. *Системы автономного электроснабжения на основе дизельных электростанций: учебное пособие* / С.Г. Обухов, И.А. Плотников – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 110 с. [Дата обращения: 08.08.2018]

[66] Будзко И.А., Лешинская Т.Б., Сукманов В.И. *Электроснабжение сельского хозяйства.* Москва: Изд-во Колос, 2000. [Дата обращения: 08.08.2018]

[67] Obukhov S.G., Plotnikov I.A. *Simulation model of operation of autonomous photovoltaic plant under actual operating conditions.* Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2017. Режим доступа:

http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/41318/1/bulletin_tpu-2017-v328-i6-04.pdf

[Дата обращения: 08.08.2018]

[68] Maehlum M.A. *Which Solar Panel Type is Best? Mono- vs. Polycrystalline vs. Thin Film*, 2018. Режим доступа: <http://energyinformative.org/best-solar-panel-monocrystalline-polycrystalline-thin-film/> [Дата обращения: 08.08.2018]

[69] Green Sarawak. WordPress. [Электронный ресурс]. *Photovoltaic – Harvesting the Power of the Sun*, 2017. Режим доступа: <https://greensarawak.com/photovoltaic-harvesting-the-power-of-the-sun/> [Дата обращения: 08.08.2018]

[70] Commercial, Residential. [Электронный ресурс]. *Solar Modules/ Panels*, 2015. Режим доступа: <http://www.ausindsolar.com.au/solar-products/solar-modules-panels> [Дата обращения: 08.08.2018]

[71] CIVICSOLAR. [Электронный ресурс]. *Monocrystalline Cells vs. Polycrystalline Cells: What's the Difference*, 2017. Режим доступа: <https://www.civicsolar.com/support/installer/articles/monocrystalline-cells-vs-polycrystalline-cells-whats-difference> [Дата обращения: 08.08.2018]

[72] Лукутин Б.В., Суржикова О.А., Шандарова Е.Б. *Возобновляемая энергетика в децентрализованном энергоснабжении*: монография / Б.В. Лукутин, О.А. Суржикова, Е.Б. Шандарова. – М.: Энергоатомиздат, 2008. – 231 с.

[73] Самойлов Д.В. *Расчет величины поступления теплоты от солнечной радиации на поверхность Земли*. Москва: Изд-во МГТУ имени Баумана Н.Е., 2006. [Дата обращения: 08.08.2018]

[74] Liu B.Y.H., Jordan R.C. *Daily insolation on surfaces tilted towards the equator*. ASHRAE Journal, 1961. [Дата обращения: 08.08.2018]

[75] Obukhov S.G., Plotnikov I.A., Kryuchkova M. *Simulation of Electrical Characteristics of a Solar Panel*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016. – V. 132: Modern Technologies for Non-Destructive Testing. Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757899X/132/1/012017/pdf> [Дата обращения: 08.08.2018]

[76] Duffie J.A., Bekman W.A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. Fourth edition. – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2013. [Дата обращения: 08.08.2018]

[77] Weather of Russia. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://meteo.infospace.ru/> [Дата обращения: 08.08.2018]

[78] Проектирование и технологии строительства дома. [Электронный ресурс]. *Автономное резервное электроснабжения дома*, 2018. Режим доступа: <http://proekt-sam.ru/proektsistem/avtonomnoe-rezervnoe-elektrosnabzhenie-doma.html> [Дата обращения: 08.08.2018]

[79] MAP Sin Energy 12/24/48/220. [Электронный ресурс]. *Technical characteristics of the solar panel TSM 200*, 2017. Режим доступа: http://www.invertor.ru/zzz/item/white_fe_mono_200_24 [Дата обращения: 08.08.2018]

[80] SMA. [Электронный ресурс]. *SMA Sunny Mini central*, 2018. Режим доступа: <https://www.sma.de/en.html> [Дата обращения: 08.08.2018]

[81] DELTA Battery. [Электронный ресурс]. *Delta DTM L - lead-acid batteries DELTA*. Режим доступа: http://www.deltabatt.com/catalog/section.php?SECTION_ID=257 [Дата обращения: 08.08.2018]

[82] Компания Дизель. [Электронный ресурс]. *Дизельный генератор АД-16 (ММЗ)*. Режим доступа: <https://www.comd.ru/catalog/dizelnye-elektrostancii-tsena-des/professional/dgu-dizel-generatory-mmz/dizelnaya-elektrostanciya-16-kvt-ad-16-t400-mmz/> [Дата обращения: 08.08.2018]

[83] ГОСТ Р 32144–2013. *Электрическая Энергия. Электромагнитная совместимость технических средств. Нормы качества электрической энергии в системах общего назначения*. – М.: Стандартинформ, 2017. Режим доступа: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/54884/> [Дата обращения: 08.08.2018]

[84] Цены на электрическую энергию (мощность), производимую электростанциями ГУЭП Облкоммунэнерго-Сбыт, 2017. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://irkobl.ru/sites/sti/Files/Prikaz%202017/355-spr.pdf> [Дата обращения: 08.08.2018]

[85] Фирма Интеграл. *Методика расчета выбросов, загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных дизельных установок*. НИИ: Санкт-Петербург, 2001. Режим доступа: <http://www.gostrf.com/normadata/1/4293852/4293852662.pdf> [Дата обращения: 08.08.2018]

[86] Knápek J., Vávrová K., Weger J., Beranovský J. *Model for evaluation of locally available biomass competitiveness for decentralized space heating in villages and small towns*. Renewable Energy, 2017. [Дата обращения: 08.08.2018]

[87] Налоговое право Российской Федерации. *Часть VIII, глава 25 – Налогооблагаемая прибыль организаций*. Режим доступа: <http://base.garant.ru/10900200/>, [Дата обращения: 08.08.2018]

[88] Консультант Плюс – Надежная Правовая Поддержка. *Классификация Основных Средств, Включаемых в Амортизационные Группы*. Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34710/1e41717903a74912327e10eb80547bd73a1f7378/ [Дата обращения: 08.08.2018]

[89] Department of energy supply. [Электронный ресурс]. *Hybrid systems for energy storage for autonomous power stations with RES penetration*. Technical report, Tomsk Polytechnic University, 2012. [Дата обращения: 08.08.2018]

[90] Average wages for the Irkutsk region by the branches of industry. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.auditit.ru/inform/zarplata/index.php?id_region=145, [Дата обращения: 08.08.2018]

[91] Trading Economics. [Электронный ресурс]. *Russia Inflation Rate – Forecast*. Режим доступа: <https://tradingeconomics.com/russia/inflation-cpi/forecast> [Дата обращения: 08.08.2018]

[92] Anderson D., Ahmed, K. *The Case for Solar Energy Investments*. World Bank Technical Paper no. 279, Washington, D.C., 1995. Режим доступа: <http://documents.worldbank.org/curated/en/160501468739541207/pdf/multi-page.pdf> [Дата обращения: 08.08.2018]

[93] Russian state bonds. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.rusbonds.ru/cmngos.asp>, [Дата обращения: 08.08.2018]

[94] Statista. [Электронный ресурс]. *Average market risk premium in Russia from 2011 to 2016*. Режим доступа: <https://www.statista.com/statistics/664923/average-market-risk-premium-russia/> [Дата обращения: 08.08.2018]

[95] MOEX. [Электронный ресурс]. *Correlation coefficients and dependency coefficients*. Режим доступа: <https://www.moex.com/a3660> [Дата обращения: 08.08.2018]

[96] Investopedia. [Электронный ресурс]. *Discounted Payback Period*. Режим доступа: <https://www.investopedia.com/terms/d/discounted-payback-period.asp> [Дата обращения: 08.08.2018]

[97] Welch I. *Corporate Finance: An Introduction*. Printing Source Inc., Marina del Rey, CA, 2011. [Дата обращения: 08.08.2018]

[98] Site about countries, cities, statistics. [Электронный ресурс]. *Плотность населения России по регионам*. Карта, 2017. [Density of the population of Russia by regions. Map, 2017]. Режим доступа: http://www.statdata.ru/nasel_regions [Дата обращения: 08.08.2018]

[99] National Energy Grid. [Электронный ресурс]. *Energy Summary: Russia, 2017*. Режим доступа: https://www.geni.org/globalenergy/library/national_energy_grid/russia/index.shtml [Дата обращения: 08.08.2018]

[100] Knápek J., Haas R. *New challenges in RES support*. 2nd International Conference on Intelligent Green Building, 2016. [Дата обращения: 08.08.2018]

Приложение А

Обзор литературы на иностранном языке

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Е	Муравьев Дмитрий Игоревич		

Консультант отделения ООП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Лукутин Борис Владимирович	Д.т.н., профессор		

Консультант – лингвист отделения ООП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Матухин Дмитрий Леонидович	к.п.н., доцент		

INTRODUCTION

Decentralized energy supply is one of the most important problems of modern power engineering. Electricity price for customers in the regions with decentralized power supply far exceeds the price for customers connected to the grid (approx. from 15 to 150 rubles in contrast to from 0.97 to 8.2 rubles per 1 kWh, respectively) [7]. The reasons for high electricity prices in the regions with decentralized power supply are high fuel transportation costs, poor maintenance of the generating equipment and variable load leading to inefficient work conditions for generating equipment.

“Energy Strategy of Russia for the period until 2035” program defines the following two strategic objectives for the use of renewable energy sources (RES) [8]:

1. Integrate new generating capacities which are operating on the basis of RES, provided they are economically efficient.
2. Develop domestic scientific and technical base, advanced technologies in the field of using RES, increase production of basic generating and auxiliary equipment for RES in Russia.

Renewable energy can make a significant contribution in solving energy supply problem in decentralized regions of Russia, which account for up to 70% of the country's territory inhabited with about 14% of population.

The most promising option for building autonomous energy systems for such decentralized areas is the integration of wind and photovoltaic (PV) stations into the diesel power supply system. Reduction of the cost of photovoltaic panels in combination with the ease of their installation and operation increase the popularity of photo-diesel autonomous energy in Russia [1].

Solar distributed generators are the most promising technologies of renewable energy sources in networks with low voltage. Distributed generators are installed to satisfy local needs for load as an additional source with a constant percentage of power from the main diesel station.

Integration of solar power plant (SPP) into stand-alone power systems (SAPS) with diesel power plant (DPP) requires a solution of many problems, in particular:

1. Variable load in remote settlements of electrification and energy of solar radiation during the day.
2. The ratio of the capacities of the diesel and photovoltaic parts of the station, depending on the configuration of SAPS.
3. Quality and value of electric power losses in SAPS with distributed photovoltaic generation.
4. Optimal configuration depending on a single or multiple block structure considering customer load.
5. Technical and economic characteristics of the SAPS, where the main interest is focused on saving the diesel fuel in DPP.

In the first step, this integration project can be represented by mathematical modeling and subsequent analysis, as these mathematical models are flexible, and they can attach additional and independent sources of electricity.

In this thesis we analyze a stand-alone system of power supply of a radial type with a voltage of 0.4 kV in the Tokma village located in Irkutsk region.

Thus, the motivation of the study is to construct a mathematical model of a hybrid power supply system with distributed photovoltaic generation. The model should be capable of making the necessary calculations of the daily variation of electric power consumption and changing insolation. The calculation results will allow determining the optimal configuration of connection by RES into the transmission electricity network consistent with the power ratio between the SPP and DPP. The quality and value losses of electric power in the SAPS are also important indicators.

The power losses in the wire are the product of the square of the current (I) and the resistance (R) of the wire, described by the formula:

$$P_w = I^2 \cdot R. \quad (1)$$

This means that when transmitting fixed power on a given wire, if the current is halved (i.e. the voltage is doubled), the power loss will be four times less [9]. Therefore, higher voltage is associated with lower transmission losses. The

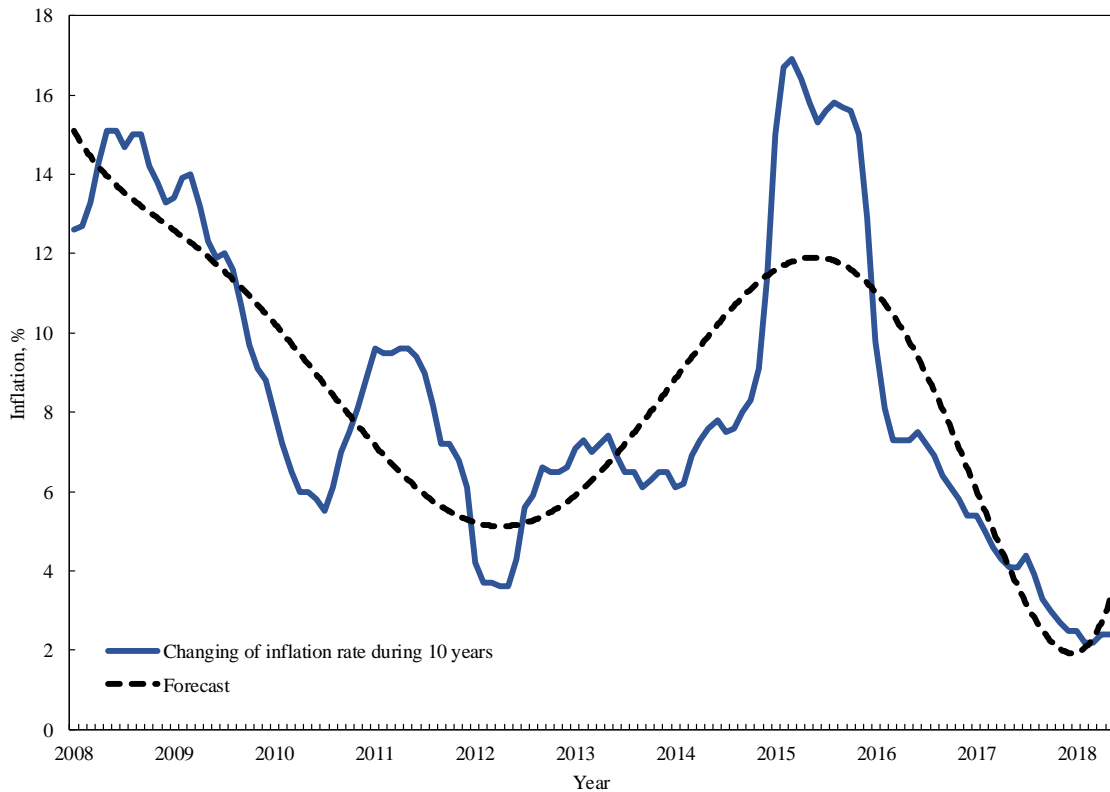
mathematical model considered in this thesis allows to increase a voltage level by adding, for instance, PV system.

The novelty of this thesis is in the contents of the energy supply system, in the algorithm of its work, and in the economic evaluation taking into account the sensitivity analysis of the project. The research is based on data from the Tokma village located in Siberia, which has decentralized access to energy supply.

All research in the thesis is done by analyzing the technical and economic performance of power systems, statistical methods of information processing and the theory of mathematical modeling. Mathematical modeling is carried out in MatLab, Homer Energy and MS Excel.

INFLATION AND (DE-) ESCALATION RATES

To provide validity result in the economic model, we need to define the rates. These rates are used to increase the cash flows over the project horizon period. Rent and taxes are expected to grow approximately with the rate of inflation, which is shown in Figure 46 – the current rate of which is 2.4% (is the rate for electricity) [91].



Source: Author's illustration.

Figure A.1 – Yearly inflation rate in Russia

The analysis of statistical sources and the reports of Trading Economics global macro models and analysts' expectations [91] are expecting to have the inflation at this rate 4.1% due to the difficult economic situation in the world, which restricts the price for main export of Russia in the long-term operating projects. The rate for the growth of wages is usually said to be slightly faster than the rate of inflation. In the long-term, the Russia Real Wage Growth is projected to trend around 5% in 2020, according to our econometric.

The changing of the diesel fuel price is a hardly predictable parameter (see Figure 47). The important fact that the biggest part of its price depends on the transportation to the region (Irkutsk region in our case). Analyzing the data provided

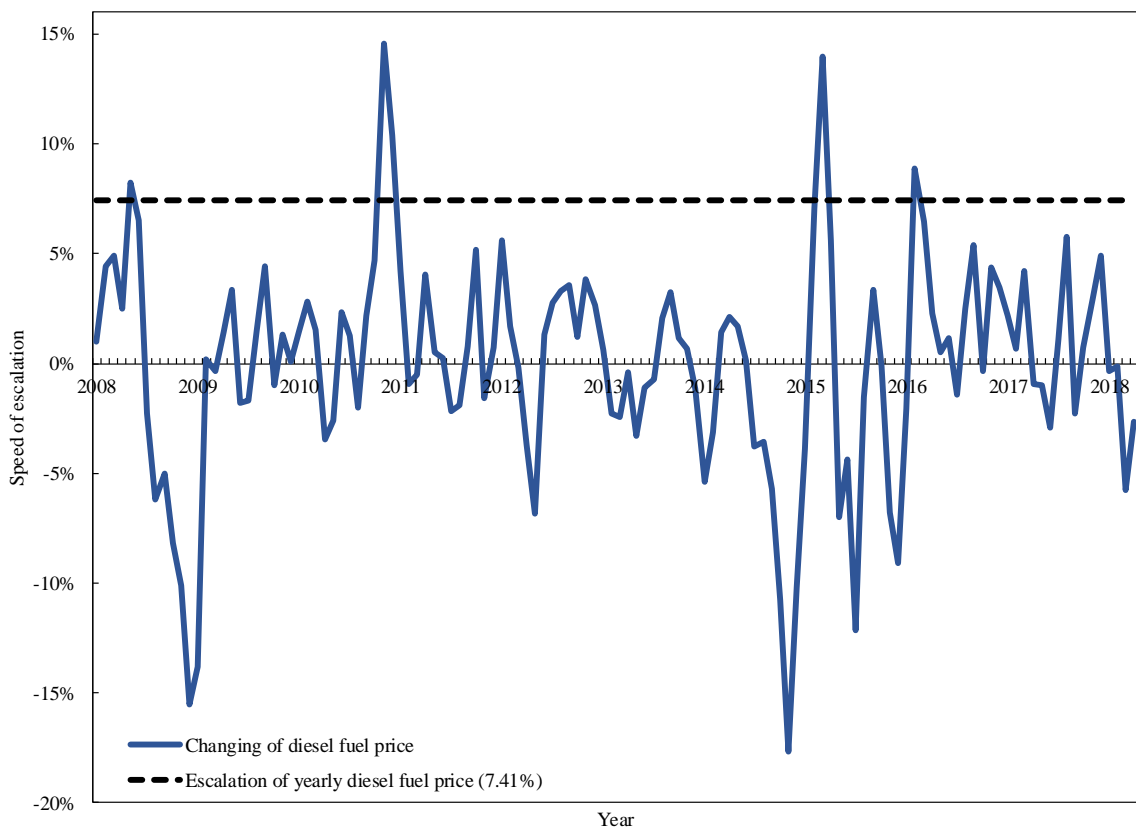
by Russian Economic School (Rossiyskaya Ekonomicheskaya Shkola), we set the escalation rate for the fuel to 7.41%. This value was obtained based on ten-years observation per each month and formalized into the following equation:

$$g_{fuel} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\left(\frac{1}{T-1} \right)} - 1, \quad (21)$$

where g_{fuel} – monthly rate of increase in the price of diesel fuel, P_1 , P_2 – an indicator of the current period and base period indicator, T – number of periods.

According to the equation (21), we can estimate a yearly escalation of diesel fuel price:

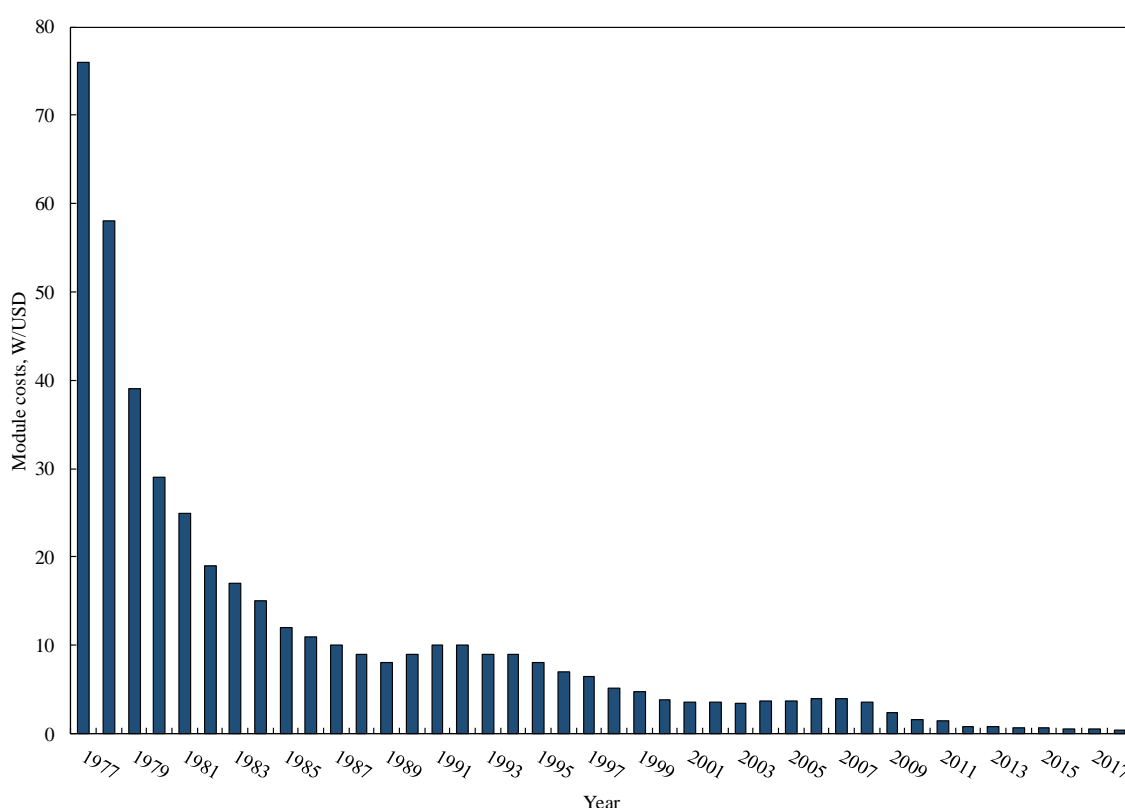
$$(1 + g_{fuel})^{12} - 1. \quad (22)$$



Source: Author's illustration.

Figure A.2 – Changing of diesel fuel price in Russia from 2008 to 2018 per each month

The progress in PV systems has also been noteworthy. Recent technical developments and reductions in the costs of all major categories of solar energy technologies have been significant. First, historical costs are shown in Figure 48. In the early 1970s, the costs of PV modules were several hundred thousand USD per peak kilowatt, and applications were largely confined to aerospace and other specialized uses. By the early 1980s costs had fallen tenfold to around USD 25 000 to USD 50 000/kWp, and by 1990 to USD 6 000/kWp, and PVs had become commercially viable for a full range of small-scale users (especially for the decentralized supply systems) [92].



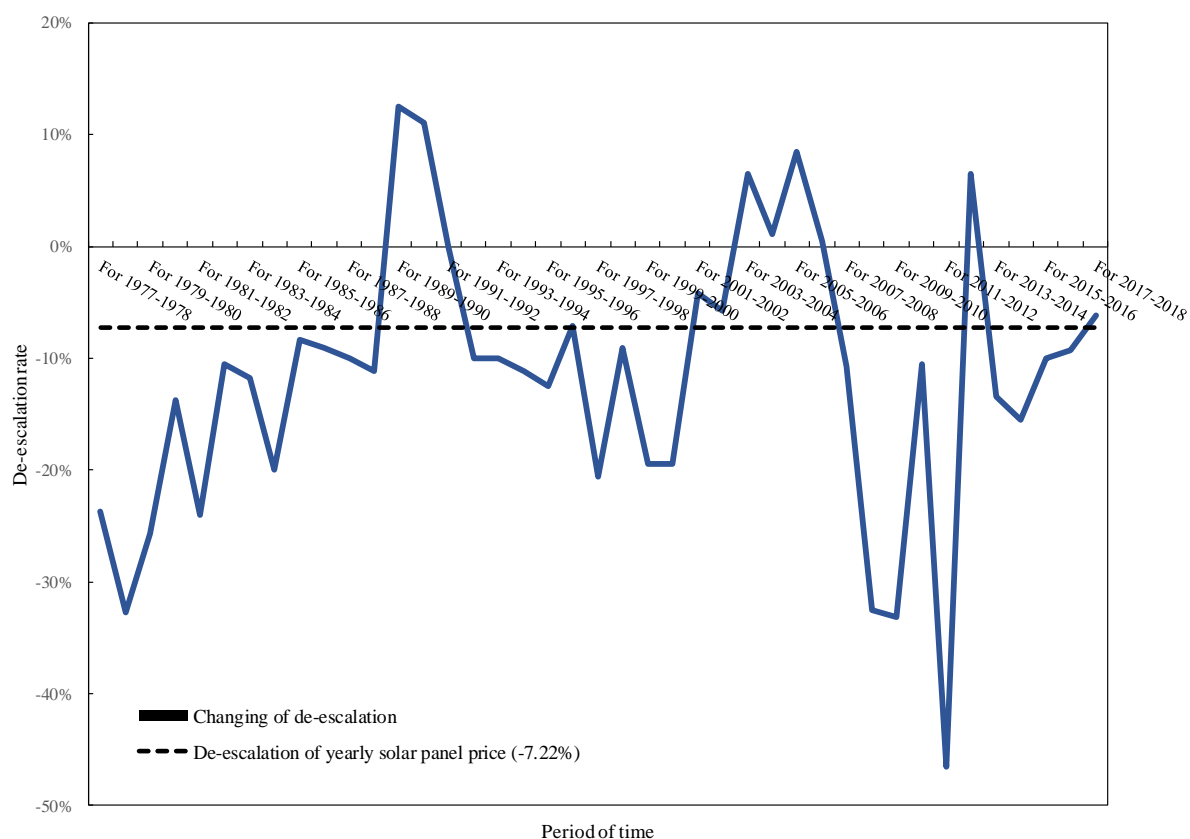
Source: Author's illustration.

Figure A.3 – Photovoltaic module costs from 1976 to 2017 [92]

Based on that aggregate data, we can define the de-escalation growth. The critical remark must be informed in our case. It is about the decades of observing periods. There is no doubt that solar energy systems are pretty new technologies, which progress is moving very fast. We need to consider a fact of PV modules prices for a relevant period of our economic model. Only last seven years can be chosen for the observation. This observation period has a shape of the curve, which is close to flat

form, it will defend our model from the previous prices drops. According to that assumption, we will get a valid de-escalation growth during the last decade with a temporary dependent level of solar panel prices.

The same principle of solar panels price de-escalation is used. For our case, we took a period between 2018 and 2017. Calculation of de-escalation solar panel price by equations (21) and (22) have got value -7.22% annually. All changes are presented in Figure 49 with the estimated de-escalation rate for solar panel price.



Source: Author's illustration.

Figure A.4 – Changing of solar panel price from 1977 to 2018

The developments during the past century in solar technologies were much stimulated by high oil prices in the period of 1973–1985 and attracted the interest of several major companies. The collapse of oil prices in the mid-1980s led some companies to scale back their investments plans, and in some cases even to shelve them, but those that continued their programs reduced costs by amounts comparable with the fall in oil prices. Thus, as real oil prices fell by 75% between 1980 and 1992 (from USD 60 to under USD 20 per barrel), those of PV modules fell by roughly 80% respectively [92, 100].

The consumption in the village will be constant. This assumption was taken from the population growth data [38]. During the five years, the population has not been changing. It is necessary to say that no additional industry is planned in the region. The profit of the company is calculated at corporate tax level of 20%. From 2017 to 2020, 3% is credited to the federal budget, 17% – to the budget of the constituent entity of Russia.

CONCLUSION

The problem of energy supply for the decentralized consumers is a nonlinear and multi-criteria function, especially for SAPS. There are not only technical, but also economic, social, and environmental constraints as well. This work combines those features and comprises an in-depth technical analysis with extensive and relevant economic evaluation. According to Energy Strategy of Russia for the period until 2035 [8], we compare all possible options of supplying electricity in the rural settlement – the Tokma village.

In the first chapter we provide a general description of the meaning of DG, literature review related on DG, as well as an international experience on the examples of Germany, the USA, China, and the Czech Republic. Also, we explain the state of DG in Russia. Aggregate results of this part have an interesting description. Based on legislation level in countries, which were presented above, all of them have a link between government and RES owners. The programs of reliable incentives, state support combined with relatively high retail trade trends, progressive and adaptable technology to produce renewable energy sources, brought the United States and Germany to the leading positions with respect to the installed capacity of distributed PV generation. This growth, as well as the development of storage accumulators, the rise of the electric vehicle market and other technologies of distributed energy, also led to several successful government's acts that provoked a number of proposals and implementations of RES projects.

In Russia, despite growing rates of construction of DG facilities, the process of focusing government's forces does not find a clear place in the long-term planning of the power supply system. There is still no understanding of the contribution that DG could make to improve development of the system and its modernization, and there is no developed state policy on this case. Therefore, one of the possible areas for improving efficient use and reducing energy consumption from a DPP as well as transmission losses from decentralized settlements is distributed PV system.

In the second chapter we present a structure of a hybrid stand-alone power system in MatLab. There we provide a general description of equipment, which was used for modeling transitional processes. The simulation results include the cases of a single SPP and distributed installation designs. The issues of electricity quality and power transmission losses of rural networks in Russia were discussed there as well. These results are compared with the case of SAPS without RES.

When the DPP is used without an SPP, then we find that the voltage level at the end of transmission line reduces by 6% and 5% in winter and summer time respectively. An auxiliary power source via SPP helps to reallocate electricity power between DPP and SPP. Based on the impact of SPP, we suggest changing the current value of the voltage at various parts of the transmission line. This integration reduces power losses in the conductors and provides greater voltage stability at the connection points of consumers of electric power. The results show that using power from the single SPP with the battery at the rate of one half of the nominal load of the system will reduce voltage drops at the end of the line by up to 4–10%. This is achieved by connecting the SPP at a distance from DPP that is not less than half of the total length of the electrical transmission line. The effectiveness of using the SPP in stand-alone power systems without energy storage systems is significantly limited by the operating conditions of the network inverters. In order to stabilize the voltage in the power system and reduce electricity losses it is advisable to use SPP with energy storage systems and connect them closer to the end of the distribution line or to the connection point of the largest consumer. It is necessary to say that it would be interesting to conduct a more in-depth study and, therefore, to attract funding and sources for this purpose. Nevertheless, we discuss possible causes of long-term changes in the state of the Tokma village.

In the third chapter we present an economic model, which reflects all aspects of integrating renewable sources. The model includes the calculation of saved costs of fuel consumption and cost of distribution losses. The estimates of project's investments, production costs, NPV approach are considered as well. The model

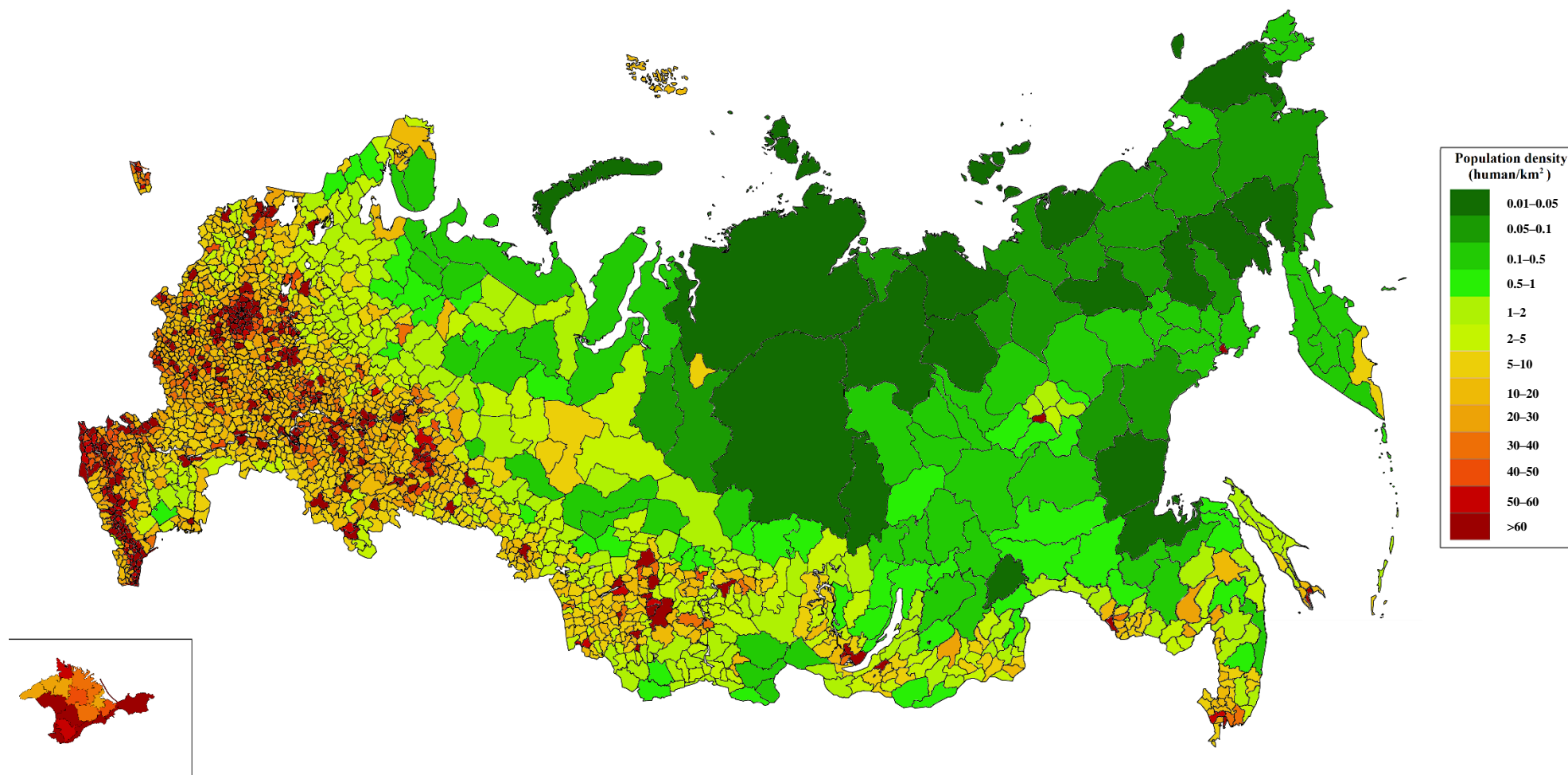
includes the environmental part with the dependence on CO₂ and other emission components on capacity load during the power system operation.

The annual energy consumption in the Tokma village is 195.1 MWh. The calculation results based on simulation of diesel fuel consumption show that the expected volume of fuel economy is about 27% and loss reduction is approximately 25% per year. Taking into account the cost of one kWh of diesel fuel as 0.26 USD (16.21 rubles), and the tariff on electricity production from DPP in the Tokma village as 0.73 USD/kWh (44.87 rubles/kWh) [84], the total amount of saved fuel and decreased transmission losses per year will be 325 USD (19 485.93 rubles). Based on SPP integration, taking into account the investment costs and a life expectancy of a project equal to twenty years, the cost of fuel, transportation, and transmission losses are decreased by approximately 8% for the final tariff (41.11 rubles/kWh or 0.66 USD/kWh). The integration of SPP into the SAPS causes a reduction of emissions into the atmosphere each year approx. by 3.8%. The integration of SPP into the SAPS does not have an influence on reduction of environmental tax in the economic model. This case has only one positive effect – the reduction of emissions weight from the DPP system. All these data were obtained with well-known financial tools such as escalation and de-escalation growth rates, inflation rate, as well as usage of discounted payback period.

Our methodology could be applied to other projects in the Irkutsk region. Even though the research in the area is extensive, this work is one of the several examples of full evaluation for Siberian electricity supply issues. The proposed hybrid for energy supply in the Tokma village shows good technical (consumption of fuel, hybrid start-ups, use of storage device) and economical (NPV, IRR) results. Potential benefits of using a hybrid power supply system could be the efficient use of energy storage device, SPP integration and its configuration in SAPS, which are useful for the decentralized areas.

Приложение Б

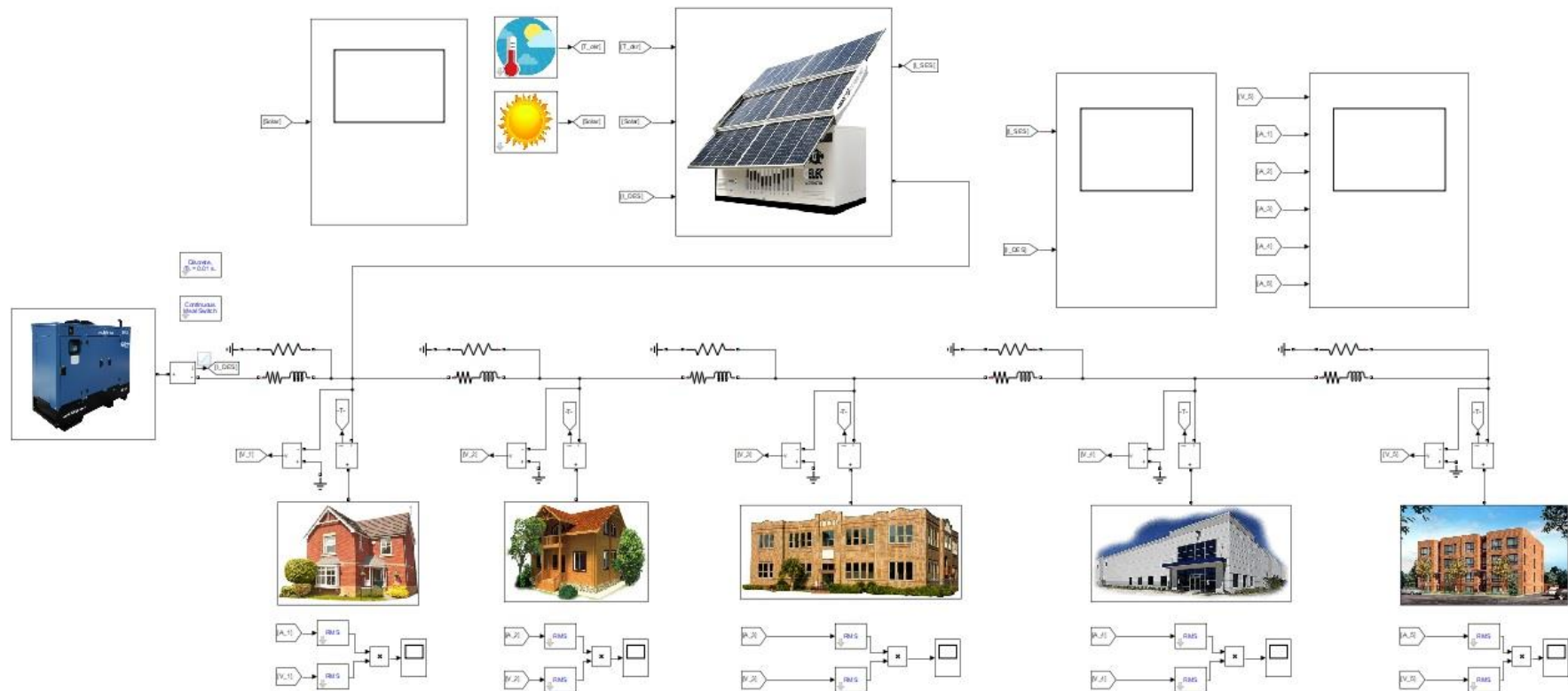
Б.1 – Карта плотности населения России за 2017 год [98]



Б.2 – Карта централизованного электроснабжения России [99]

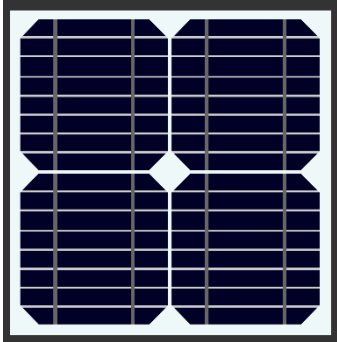
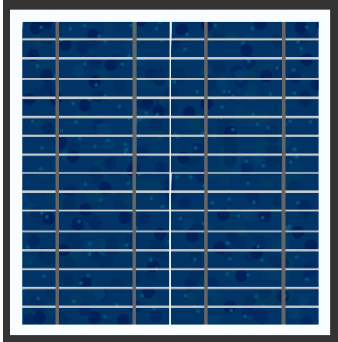
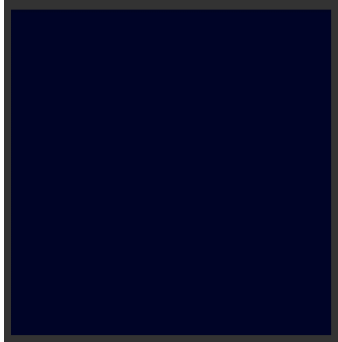


Б.3 – Выполненная модель АСЭС в MatLab/Simulink



Приложение В

В.1 – Технико-экономический анализ солнечных панелей [68–71]

Design			
	Monocrystalline solar panel	Polycrystalline solar panel	Thin film solar panel
Efficiency	15%–22%	13%–18%	9%–11%
Temperature resistance	Performance drops 10–15% at high temperatures	Less temperature resistant than monocrystalline	Tolerates extreme heat
Life time	25–30 years	20–25 years	15–20 years
Length of warranty	25 years	25 years	10–25 years
Lowest price	0.75 USD/W	0.62 USD/W	0.69 USD/W
Area required for 1 kWp	6–9 m ²	8–9 m ²	13–20 m ²
Additional details	Oldest cell technology and most widely used	Less silicon waste in the production process	Tend to degrade faster than crystalline-based solar panels. Low availability on the market